

Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden korkeakoulu
Energia- ja LVI-tekniikan koulutusohjelma

Henri Oksanen

Asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmän optimointi uudis- ja korjausrakentamiskohteissa

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoo 12. tammikuuta 2015

Valvoja: Professori Kai Siren

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Eero Ikäläinen

Tekijä Henri Oksanen

Työn nimi Asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmän optimointi uudis- ja korjausrakentamiskohteissa

Koulutusohjelma Energia- ja LVI-tekniikka

Pääaine LVI-tekniikka

Professuurikoodi Ene-58

Työn valvoja Professori Kai Sirén

Työn ohjaaja Diplomi-insinööri Eero Ikäläinen

Päivämäärä 12.1.2015

Sivumäärä 105

Kieli suomi

Tiivistelmä

Rakennusten energiamääräykset tiukentuvat entisestään tulevaisuudessa vuonna 2010 Euroopan parlamentissa hyväksytyn energiadirektiivin vuoksi. Energiamääräyksiä vaatimusten toteuttamiseksi joudutaan rakennuksiin suunnittelemaan energiatehokkaita järjestelmiä, jotka ottavat energiansa uusiutuvista energianlähteistä. Suomessa asuinkerrostaloissa kaukolämpöjärjestelmä on vallitseva lämmitysmuoto, mutta myös maalämmön osuus kasvaa. Maalämmön valinta edellyttää kuitenkin erityisen tarkkaa järjestelmien suunnittelua energiakaivojen ja maaperän välisten lämpövirtojen monimutkaisuuden takia. Energiakaivojen lämmönsiirto monimutkaistuu entisestään, jos energiakaivot asennetaan energiakaivokentäksi. Tällöin kaivot vaikuttavat toistensa toimintaan.

Tutkimuksen tavoitteena oli optimoida maalämpö- ja jäähdytysjärjestelmä kolmeen Espoon Leppävaaraan rakennettavaan asuinkerrostaloon. Rakennuksille tehtiin energiasimulointi, jonka tuloksena saatiin selville rakennusten vuotuinen energiakulutus. Vuotuisen energiankulutuksen perusteella rakennuksille mitoitettiin maalämpöpumppu ja energiakaivokenttä. Energiakaivokentän mitoittamiseen tarvittavat maaperän ominaisuudet selvitettiin aiemmin tutkimuskohteen maaperään tehdyn TRT-testin tuloksista. Tämän jälkeen maalämpöjärjestelmä optimoitiin elinkaarikustannuksiltaan optimaaliseksi. Optimoinnissa päätösmuuttujina käytettiin lämpöpumpun tehoa, energiakaivojen syvyyttä sekä energiakaivojen lämmönsiirtonesteen massavirtaa.

Optimaaliseksi järjestelmäksi valikoitui 100 kW lämpöpumppu, jonka lämmönkeruupiiri koostuu yhdestätoista 99,1 metriä syvästä energiakaivosta, joissa liikkuu lämmönsiirtoneste 3,6 kg/s massavirralla jakautuen tasaisesti kaivojen kesken. Valikoidun järjestelmän takaisinmaksuaika verrattuna kaukolämpöjärjestelmään on 5,7 vuotta, jos kaukolämpöjärjestelmä ei sisällä kaukokylmää. Tämä tarkoittaa, että maalämpöjärjestelmä tuottaa 5,7 vuoden aikana järjestelmän kaukolämpöön verrattuna suuremmat investointikustannukset takaisin vuotuisina ostoenergian kustannussäästöinä. Tämän jälkeen maalämpöjärjestelmä alkaa tuottaa taloudellisesti voittoa. Taloudellinen voitto on kymmenen vuoden tarkastelujakson aikana yli 20 000 € ja kolmenkymmenen vuoden aikana yli 100 000 €. Maalämpö- ja jäähdytysjärjestelmässä on myös vapaajäähdytys, joka edistää energiakaivokentän toimintaa siten, että se lämmittää maaperää kesäaikana. Jäähdytys myös parantaa asuinkerrostalon asukkaiden tyytyväisyyttä kesäajan lämpötilaan.

Avainsanat energiakaivo, maalämpöpumpun mitoitus, energiakaivokentän mitoitus, optimointi, takaisinmaksuaika, elinkaarikustannukset

Author Henri Oksanen

Title of thesis Geothermal system optimization of residential apartment building in new buildings and renovation projects

Degree programme Energy and HVAC-Technology

Major HVAC-Technology**Code of professorship** Ene-58

Thesis supervisor Professor Kai Sirén

Thesis advisor Eero Ikäläinen, M.Sc. (Tech.)

Date January 12, 2015**Number of pages** 105**Language** Finnish

Abstract

Energy requirements of buildings will be tightened even further in the future, due to the Energy Directive, which approved in European Parliament in 2010. It will be designed energy-effective systems to buildings, which takes their used energy from renewable energy sources, that buildings meet the energy requirements of buildings. District heating is dominant heating system in apartment houses in Finland at the time but share of geothermal is growing up. However, a selection of geothermal imperatives particularly accurate design, because heat flows between boreholes and soil are very complex. Heat transfer will come more complex in the boreholes if boreholes set a borehole field. In that case, boreholes will affect heat transfer of each other.

The target of investigation was optimizing of geothermal system into three to be built apartment houses in Leppävaara in Espoo. The energy simulation was made to the buildings and from the result of simulation was gotten yearly energy demand of the buildings. Based on yearly energy demand of the buildings, it was designed a ground source heat pump and a borehole field. Needed features of soil for design of the borehole field were gotten from the result of Thermal Response Test. TRT-test had been made to soil of the building plot. After that the geothermal system was optimized. The variables of the optimizing had power of the heat pump, deep of the boreholes and mass flow of heat transfer fluid in the boreholes.

The most optimal system was been selected the 100 kW ground source heat pump from the optimizing. The brine circuit of the system is eleven boreholes which deep are 99.1 meters. The heat transfer fluid in the brine circuit is moved 3.6 kg/s mass flow. The payback time of optimized geothermal system is 5.7 years, if the life-cycle cost of geothermal system is compared with life-cycle cost of district heating without district cooling. This means that the geothermal system generates district heating as compared to higher investment cost of the system back by yearly cost savings in 5.7 years. After that the geothermal system begins to generate profits. The profit is over 20 000 € during the ten years review period and over 100 000 € during the thirty years review period. The cooling is operated on free cooling in the geothermal system. The free cooling is advanced the operation of borehole field in the summer time by to warm soil up. The cooling also improves the satisfaction of inhabitant with temperature in the apartment house in the summer time.

Keywords borehole, design of ground source heat pump, design of borehole field, optimization, payback time, life-cycle cost

Esipuhe

Diplomityöni on tehty yhteistyössä Avara Oy:n kanssa liittyen Avaran vireillä olevaan asuinkerrostalohankkeeseen. Olen todella kiitollinen Avara Oy:n ja Ovenia Oy:n diplomityön ohjauksessa mukana olleille asiantuntijoille heidän avustaan ja mahdollisuudesta saada tehdä diplomityö heidän hankkeensa osana.

Suurkiitos työni valvojalle Kai Sirenille, jonka neuvoilla ja vinkeillä sain saatettua työni loppuun. Haluan myös kiittää työnantajaani ISS Proko Oy:tä ja ohjaajaani Eero Ikäläistä, jotka mahdollistivat diplomityön tekemisen mielenkiintoisen hankkeen yhteydessä. Lisäksi hänen kannustuksellaan diplomityöni valmistui aikataulussaan. Haluan kiittää myös Mika Vuolletta ja Erkki Karjalaista tutkimuksessani tarvittavan ohjelman käyttö-oikeudesta ja -koulutuksesta.

Lopuksi haluan kiittää myös kaikkia läheisiäni, jotka jaksoivat kannustaa työn tekemiseen sekä avustaa työn kieliopin tarkastamisessa.

12.1.2015

Henri Oksanen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	1
Abstract	2
Esipuhe	3
Symboliluettelo	6
1 Johdanto	9
1.1 Tutkimuksen tausta	9
1.2 Tutkimusongelma	12
1.3 Tutkimuksen tavoitteet	13
2 Maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmä	15
2.1 Maalämpöpumppu	16
2.2 Maalämpö lämmönlähteenä	20
2.3 Energiakaivo	22
2.4 Lämmön siirtyminen energiakaivossa	28
2.4.1 Lämpötaseet energiakaivossa lämpöpiirimenetelmällä	29
2.4.2 Yhdestä U-putkienergiakaivosta saatava lämpö- ja jäähdytysteho	36
2.4.3 Analyytinen menetelmä U-putkienergiakaivon lämmönsiirron määrittämiseen	38
2.4.4 Numeerinen menetelmä U-putkienergiakaivon lämmönsiirron määrittämiseen	41
2.4.5 Differenssimenetelmään perustuva numeerinen ratkaisu	42
2.4.6 Energiakaivokentän vaikutukset yhden energiakaivon lämmönsiirtoon ..	43
3 Maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmän tuomat vaatimukset asuinkerrostalon suunnitteluun ja rakentamiseen	45
3.1 TRT-mittaus	45
3.2 Energiakaivokentän mallintaminen ja mitoitus	47
3.3 Maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmän laitevaatimukset	49
3.4 Lisä- ja varalämmitys	51
3.5 Lämpimän käyttöveden valmistaminen maalämpöpumpulla kesäaikana	53
3.5.1 Lämpimän käyttöveden lämmittämisessä esiintyneet ongelmat kesäaikana	53
3.5.2 Mahdolliset parannusmahdollisuudet esiintyviin ongelmiin	55
4 Uudisrakennuskohteen energialaskelmat	57
4.1 Simulointikohteen kuvaus ja tekniset tiedot	58
4.2 Energialaskelmat ja -simulointi	59
4.3 Maalämpöpumpun mitoitus	65
4.3.1 Maalämpöpumpun mitoituksen lähtötiedot	66

4.3.2	Lämmitys- ja jäähdytysteho.....	67
5	Uudisrakentamiskohteen investointilaskelmat	69
5.1	Tutkimuksen investointilaskelmien metodiikka	69
5.2	Tutkimuksen investointilaskelmat	72
6	Energiakaivokentän mallintaminen uudisrakennuskohteeseen	74
6.1	Simulointikohteeseen mitoitettavien ja mallinnettavien maalämmön energiakaivokenttien lähtötiedot.....	77
6.2	Energiakaivojen mallintaminen IDA-ICE:lla	78
6.3	Mallinnetun energiakaivokentän ja maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmän aiheuttama vuositason ostoenergian kulutus.....	81
6.4	Kaukolämpöjärjestelmän aiheuttama vuositason ostoenergian kulutus.....	83
7	Maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmän tarvitseman vuositason ostoenergian ja investointikustannuksien optimointi	84
7.1	Optimointimenetelmä ja -työkalu	84
7.2	Optimointi	85
8	Optimoinnin tulokset ja arvio maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmän kannattavuudesta uudiskerrostalorakennuksissa.....	89
8.1	Optimoinnin tulokset.....	89
8.2	Optimoidun maalämpöjärjestelmän takaisinmaksuaika sekä maa- ja kaukolämpöjärjestelmien nykyarvojen vertailu	93
9	Yhteenvedo	95
	Lähteet	98
	Liitteet.....	104
	Liite 1. Optimoidun järjestelmän energiasimuloinnin tulokset.	104

Symboliluettelo

Latinalaiset aakkoset

A_s	U-putken pinnan pinta-ala
C	lämpökapasiteetti
c_r	ominaislämpökapasiteetti
COP_{heating}	maalämpöpumpun lämpökerroin
D	putken halkaisija
e	eskalaatio
E_{komp}	maalämpöpumpun kompressorin ottama sähköteho
E_{pump}	kiertopumppujen ottama sähköteho
F	funktio
f	putkivirtauksen muodosta riippuva kitkatekijä
f_{inf}	inflaatio
H	konduktanssi
h	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin
I	investointikustannukset
i	valittu laskentakorko (nimelliskorko)
k	täyteaineen lämmönsiirtokerroin
K_k	tarkastelujakson kulut
L	lämmönsiirto-putkiston pituus
n	vuosia kuvaava parametri
\dot{m}	U-putkessa kulkevan lämmönsiirtonesteen massavirta
Q_{cool}	jäähdytysenergian tarve
Q_{heat}	lämmitysenergian tarve
Q_1	maalämpöpumpun lauhdutinteho
q_{50}	rakennuksen ilmavuotoluku
\dot{Q}	lämpö- tai jäähdytysteho energiakaivosta
q'	lämmönsiirto pituusyksikköä kohden lämmönsiirtoaineen ja energiakaivon seinän välillä
q''	lämpövirta kallion ja energiakaivon välillä jatkuvuustilassa
\dot{q}_s	lämpövirtaus U-putken pinnan neliötä kohden

$q_{v,vuotoilma}$	rakennuksen vuotoilman tilavuusvirta
P	nykyarvo
R	aineiden ja materiaalien välinen lämpövastus
r	säde
r_e	eskalaation huomioon ottava reaalikorko
r_i	inflaation huomioon ottava reaalikorko
Re	Reynoldsin luku
S	jäännösarvo
t	aika
ΔT_{am}	aritmeettisen keskilämpötilan muutos
ΔT_{avg}	lämpötilan asianmukainen erotus lämmönsiirtonesteeseen ja U-putken pinnan välillä
T_g	lämpötila energiakaivon täyteaineessa
T_i	lämpötila lämmönsiirtonesteessä sisään kaivoon
T_k	tarkastelujakson tuotot
T_m	U-putken sisällä virtaavan lämmönsiirtonesteeseen keskimääräinen lämpötila
T_o	lämpötila lämmönsiirtonesteessä ulos kaivosta
T_p	U-putken pinnan lämpötila
T_s	lämpötila maaperässä
\dot{V}	tilavuusvirta
w	lämmönsiirtonesteeseen virtausnopeus
x_c	puolet sisään- ja ulosmenoputkien keskikohtien välisestä etäisyydestä
x	ilmanvuotoluvun laskennassa käytetty rakennuksen kerrosluvun kerroin
z	energiakaivon syvyys

Kreikkalaiset aakkoset

β_0	kokeellisesti määritetty muotokerroin
β_1	kokeellisesti määritetty muotokerroin
γ	lämmönjohtumista kuvaava parametri
δ_{gap}	lämpövastuskerroksen paksuus
ϕ	lämmönsiirtoa kuvaava parametri
λ	lämmönjohtavuus
η_{pump}	kiertopumpun mekaaninen hyötysuhde
ρ	tiheys
σ	laskennallinen arvo
ν	kinemaattinen viskositeetti

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Rakennusten energiamääräykset tiukentuvat tulevaisuudessa entisestään vuonna 2010 voimaan astuneen energiadirektiivin (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2010/31/EU) myötä. Energiadirektiivi velvoittaa, että vuoden 2020 loppuun mennessä kaikki uudet rakennukset ovat lähes nollaenergiarakennuksia (Euroopan parlamentti & Euroopan unionin neuvosto, 2010). Jotta lähes nollaenergiarakennustavoite saavutettaisiin, pitäisi rakennusten lämmitys-, jäähdytys- ja ilmanvaihtojärjestelmien olla energiatehokkaita, ja energia pitäisi olla tuotettu uusiutuvista energianlähteistä. Geoterminen energia yksi suurimmista uusiutuvan energian lähteistä, jota tulevaisuudessa tavoitteiden saavuttamiseksi hyödynnetään. Vuonna 2010 geotermistä energiantuotantoa oli asennettu maailmanlaajuisesti 10 715 MW, ja vuoden 2015 vastaavaksi lukemaksi on ennustettu jopa 18 500 MW. (Bertani, 2010) Näin ollen asennetun geotermisen energiantuotannon määrän on ennustettu lähes kaksinkertaistuvan, mikä on osaltaan seurausta energiadirektiivin mukanaan tuomista vaatimuksista. (World Energy Resources, 2013) (Antics & Sanner, 2007)

Maalämpöpumppujärjestelmä on yksi geotermistä energiaa hyödyntävistä järjestelmistä, ja se on yleistynyt etenkin asuinrakennuksissa. Euroopan laajuudella tarkasteltaessa maalämpöpumppujärjestelmät ovat tällä hetkellä useimmin esiintyvä geotermisen energian hyödyntämisjärjestelmä. Euroopassa maalämpöpumppuja oli asennettu vuonna 2011 noin 1,2 – 1,3 miljoonaa kappaletta. Nyt asennettujen maalämpöpumppujen määrän Euroopassa arvioidaan olevan jo yli 1,5 miljoonaa kappaletta, jos tasainen kasvuvauhti on pysynyt ennallaan. Näistä kaikista maalämpöpumpuista noin 75 prosenttia on asennettu Ruotsiin, Saksaan, Ranskaan ja Sveitsiin. Ruotsi on kehittynein valtio maalämpöpumppujen määrää tarkasteltaessa, sillä Ruotsissa vuonna 2008 jopa 97 prosenttiin uusista taloista asennettiin maalämpöpumppu. Ruotsissa maalämmön vahvan aseman on mahdollistanut valtion myönteinen politiikka ja maalämmön tutkimuksiin myönnetty tukirahat. Ruotsin valtio aloitti maalämmön systemaattisen kehitys- ja tutkimustoiminnan heti 1970-luvun alun energiakriisin jälkeen (Saari, 2009). Ajoissa aloitettu kehitystoiminta kantaa siis nyt hedelmää. Esimerkiksi vuonna 2009 Ruotsissa valmis-

tettiin markkinoille lähes 100 000 lämpöpumppua, kun Suomessa vastaava lukema oli vain muutama tuhat (Saari, 2009). Myös Saksassa poliittinen päätös tukea uusiutuvia energianlähteitä on edistänyt maalämmön asemaa. Suurien tukirahojen avulla sekä Ruotsissa että Saksassa myös tutkitaan paljon maalämmön kehitysmahdollisuuksia. (Bayer, et al., 2012)

Kaikki edellä mainittua neljä maata – Ruotsi, Saksa, Ranska ja Sveitsi – sijaitsevat kylmällä vyöhykkeellä, jossa rakennusten lämmittäminen on merkittävämmässä osassa kuin jäähdytys. Maalämpöpumppua hyödynnetäänkin etenkin tilojen lämmittämiseen ja lämpimän käyttöveden tuottamiseen. Jos maalämpöpumppujen asemaa tarkastellaan tilojen lämmityksen kannalta, maalämpöpumput ovat erittäin merkittävässä roolissa Skandinaviassa. Esimerkiksi Ruotsissa 20,3 %, Norjassa 9,4 % ja Suomessa 7,1 % tilojen lämmitystarpeesta tuotetaan maalämpöpumppujärjestelmällä. Näiden lisäksi Sveitsissä vastaava lukema on 5,4 %. Muissa Euroopan maissa luku on noin 1 %. (Bayer, et al., 2012)

Ilmasto on suurin yksittäinen tekijä, joka luo lämpöpumppujärjestelmälle vaatimuksia, mikä käy ilmi asiaa tarkasteltaessa jo Euroopan laajuudella. Keskilämpötilat Etelä- ja Pohjois-Euroopassa eroavat toisistaan noin 8 – 10 °C, mikä aiheuttaa lämpöpumpulle huomattavan erilaiset vaatimukset. Etelä-Euroopassa vaaditaan jäähdytyspainotteinen maalämpöjärjestelmä ja Pohjois- ja Keski-Euroopassa lämmityspainotteinen järjestelmä. Molemmissa järjestelmissä on kuitenkin lämpimän käyttöveden tuotantotarve maantieteellisestä sijainnista riippumatta. Etelä-Euroopan maiden lämpimän käyttöveden tuotannon energiankulutusta Keski- ja Pohjois-Euroopan vastaavaan kulutukseen verrattaessa on näiden välillä havaittavissa selviä eroja. Etelä-Euroopassa keskiarvallisesti lämpimän käyttöveden tuottamisen energiankulutus on hieman vähäisempää kuin Keski- ja Pohjois-Euroopassa. Pienempi energiankulutus on selitettävissä jo ilman keskilämpötilojen erolla, mutta Etelä-Euroopasta löytyy myös valtioita, joiden lämpimän käyttöveden lämmittämisen energiankulutus taloa kohden on poikkeuksellisen suuri – tällaisesta esimerkkinä on Espanja. Pohjois-Euroopassa vuonna 2009 poikkeuksellisen paljon energiaa lämpimän käyttöveden lämmittämiseen taloa kohden kuluttivat etenkin Viro ja Irlanti. (Environment European Agency , 2012)

Jos energiadirektiivin määräyksien kiristymisestä aiheutuneita toimenpiteitä tarkastellaan Suomessa, ovat energiadirektiivin uudet määräykset heijastuneet etenkin uudispientaloihin. Vuonna 2010 uudispientaloihin asennettiin maalämpöpumppuja lähes kuusinkertainen määrä vuoteen 2000 verrattuna. (Vihola & Heljo, 2012). Suuremmissa rakennuksissa kuten asuinkerrostaloissa maalämpöpumppujen lisääntyminen ei kuitenkaan vielä ole näkynyt yhtä selvästi, koska asuinkerrostalot sijaitsevat usein kaukolämpöverkoston läheisyydessä. Tästä syystä kaupungit eivät välttämättä edes anna lupia maalämpöputkistojen porauksille. Joka tapauksessa uudisasuinkerrostalot ovat tulevaisuudessa yksi tärkeimmistä energiaparannuskohteista, joiden energiatehokkuuteen joudutaan erityisesti kiinnittämään huomiota ja joissa joudutaan arvioimaan esimerkiksi maalämmön mahdollisuus. Myös korjausrakentamisen yhteydessä asuinkerrostalorakennuksien lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmät sekä rakenteet tulee korjata vaatimuksien mukaisiksi. Tämä lisää korjausrakentamisen haasteita entisestään ja pakottaa suuriin investointeihin.

Energiadirektiivin vaatimuksien toteutumisen kannalta on tärkeä tutkia, mitkä järjestelmät ja rungon rakenteet ovat asuinkerrostaloissa elinkaarikustannuksiltaan kannattavimpia, ja ovatko suunnitellut korjausratkaisut taloudellista toteuttaa. Rakennusten eristepaksuudet ja tiiviyydet ovat kasvaneet entisestään, vaikka hyödyllisyyden ja taloudellisuuden rajat tulevat jo vastaan. Rakenteiden tiiviyn kasvattamisen lisäksi energiantuotantojärjestelmät ovat suurimpia kehityskohteita, joilla pystytään parantamaan rakennusten energiatehokkuutta. Aurinko on maailman suurin hyödyntämätön energianlähde, mikä johtuu aurinkojärjestelmien vielä heikosta hyötysuhteesta energianlähteenä sekä vähäisistä mahdollisuuksista varastoida auringosta tuotettua sähkö- tai lämpöenergiaa. Lisäksi energiatehokkaat aurinkojärjestelmät ovat vielä teknisesti vaikeampia toteuttaa kuin esimerkiksi energiatehokkaat maalämpöjärjestelmät. Heikomman energiatehokkuuden ja sen vuoksi pienemmän kysynnän takia aurinkojärjestelmät ovat kalliimpia. Tästä syystä aurinkoenergian tuotantomäärä ei ole vielä lähtenyt voimakkaaseen nousuun.

Tällä hetkellä energiatehokas maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmä on huomattavasti kannattavampi toteuttaa kuin tällä hetkellä vielä heikolla tehokkuudella toimivaan aurinkoenergiajärjestelmään. Tämän vuoksi maalämpöjärjestelmät ovat lähiaikana tärkeimpiä järjestelmiä, joilla pystytään parantamaan rakennusten energiatehokkuutta. Juu-

ri maalämpöjärjestelmän paremman tehokkuuden ja investointimäärän kasvun aiheuttaman investointikustannuksien putoamisen takia, maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmät ovat lisääntyneet Suomessa huomattavasti asuinrakennuskannan uudistuotannossa 2000-luvulla. Vuonna 2000 maalämmön suhteellinen osuus asuinrakennuskannan uudistuotannossa oli vain noin 2 %. Vuoteen 2012 mennessä suhteellinen osuus oli kuitenkin nousut jo lähes 20 prosenttiin. Lämmitystapavertailussa koko asuinrakennuskannan uudistuotannon suurta prosentuaalista osuutta kasvattaa huomattavasti uudispientalorakennuksien maalämmön noin 30 prosentin osuus. Asuinkerrostalojen uudistuotannossa maalämmöllä on vain minimaalinen osuus, Suomen kohtuullisen kattavan kaukolämpöverkoston vuoksi. Erillispientalojen uudistuotannossa maalämmön suhteellisen osuuden lisääntyminen on pääasiassa tapahtunut sähkö- ja öljylämmityksen kustannuksella. Sähkö- ja öljylämmityksen yhteen laskettu osuus on samaisena aikana vähentynyt merkittävästi noin 45 prosentista 30 prosenttiin. Jos mitään mullistavaa ei energiantuotantomuodoissa tapahdu, jatkuu suuntaus vastaavanlaisena myös tulevaisuudessa. (Vihola & Heljo, 2012) (Juvonen & Lapinlampi, 2013)

Maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmillä on tällä hetkellä keskeinen asema asuinrakennuksien lämmöntuotantojärjestelmien energiatehokkuusparannuksissa, minkä vuoksi tässä tutkimuksessa käsitellään maalämpö- ja jäähdytysjärjestelmien optimaalista suunnittelua ja asennusta simulointikohteena oleviin kolmeen uudisasuinkerrostaloon, jotka rakennetaan Espoon Leppävaaraan. Tutkimuksessa vertaillaan myös uudisasuinkerrostalojen elinkaarikustannuksia maalämpöjärjestelmien ja kaukolämpöjärjestelmän kesken. Jotta tutkimustulos ei perustuisi ainoastaan laskennalliseen tulokseen, pyritään tutkimuksessa vertailemaan myös maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmäasennuksien tuomia erilaisia ongelmia, joita esiintyy etenkin saneerauskohteissa. Uudisrakennuskohteiden ongelmien tarkastelu on varmasti pidemmän päälle kannattavaa, ja niille pyritään tutkimuksessa myös esittämään parannus- ja ratkaisuehdotuksia.

1.2 Tutkimusongelma

Simulointi kohteena olevaan kolmeen uudisasuinkerrostaloon suunnitellaan ja rakennetaan alustavasti koko lämmitys- ja -jäähdytysenergian tarpeen kattava maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmä, joka vaatii laajemman energiakaivokentän, jotta maaperästä saadaan otettua käyttöön riittävä määrä geotermistä energiaa. Ongelmaksi voi muodostua

kuitenkin tontin laajuus, jos energiakaivokentän koko laajenee liian suureksi. Energia-kaivokenttä pitää ulkoisista rajoittavista tekijöistä huolimatta mitoittaa teknisesti toimivaksi ja taloudellisesti kannattavaksi. Tällöin maalämpöjärjestelmän lämpöpumpun mitoitus on merkittävimmissä osassa taloudellista kannattavuutta selvittäessä. Mahdollisesti osa lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmän vaatimasta maksimitehosta olisi taloudellisesti kannattavaa tuottaa jollain muulla lisälämmitysmuodolla.

Pääasiallinen tutkimusongelma on kuitenkin maalämpöjärjestelmän tarvitseman vuositasen ostoenergian kustannuksien ja investointikustannuksien optimointi. Monitavoitteisen optimointiongelman rajoitteena on maapiirin lämmönsiirtonesteen lämpötila ja päästömuuttujina ovat maalämpöpumpun teho, energiakaivojen määrä ja syvyys sekä ja maanpiirin lämmönsiirtonesteen massavirta. Lisäksi lisälämmitysmuodon vaikutus vuositasen ostoenergian määrään on tutkittava, eli olisiko esimerkiksi jokin muu lisälämmitysmuoto kuin sähkölämmitys taloudellisesti kannattavaa asentaa lisälämmitysmuodoksi.

Toisena osana tutkimusongelmaa on maalämpöpumpun kuormituksen pienentäminen kesäaikana lämpimän käyttöveden lämmittämisessä. Ongelmaa tarkastellaan lämpöpumpun kompressorin kannalta: kuinka kompressorin kuormitusta voisi pienentää tai kompressorin fyysistä kestävyyttä parantaa. Neljäntenä osana tutkimusongelmaa on uudisasuinkerrostalojen maalämmön ja kaukolämmön elinkaarikustannusvertailu. Maalämmön osalta tutkitaan useaa vaihtoehtoista lämpöpumpun mitoitusvaihtoehtoa, eli kuinka monta prosenttia maalämpö kattaa rakennuksien yhteenlasketusta maksimilämmitystehosta. Kaukolämpöä tutkittaessa otetaan huomioon uuden kaukolämpöyhtiöiden määräyksen vaikutukset kaukolämmön elinkaarikustannuksiin. Kaukolämpöyhtiöiden määräyksen mukaan vuoden 2014 alusta alkaen ensiöpuolen paluuvesi saa maksimissaan olla 20 °C.

1.3 Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena on mitoittaa kolmeen uudisasuinkerrostaloon maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmä, jonka kuluttama vuositasen ostoenergia sekä investointikustannukset on optimoitu. Optimoinnissa otetaan huomioon energiakaivokentän laajuus sekä mahdollisen lisälämmityksen määrä ja tuotantomuoto. Lisälämmitys tarvitaan, jos on

taloudellisempaa investoida maalämpöjärjestelmä kattamaan vain osa tarvittavasta maksimilämmitystehosta. Maalämpöjärjestelmän vaatima lämpökaivokenttä mitoitetaan asianmukaisilla lähtöarvoilla optimoinnin asettamien vaatimuksien mukaan.

Tutkimuksen toisena tavoitteena on selvittää kesäajan lämpimän käyttöveden lämmittämiseen liittyvät ongelmat. Muita käsiteltäviä kohteita ovat maalämpöpumpun kompressorien kuormituksen pienentämisen mahdollisuudet sekä mahdolliset ulkopuoliset lämmönlähteet kuten aurinko. Lisäksi tutkimuksen tavoitteena on vertailla asuinkerrostalojen lämmitysmuotojen, maalämmön ja kaukolämmön, elinkaarikustannuksia sekä määrittää näistä lämmitysmuodoista taloudellisesti kannattavampi vaihtoehto uudisasuinkerrostaloon tai saneerattavaan asuinkerrostaloon.

2 Maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmä

Maalämpö- ja jäähdytysjärjestelmä perustuu lämpöpumpun ja lämmönkeruupiirin yhteistyöhön, joka mahdollistaa maaperästä ja kalliosta saatavan geotermisen energian hyödyntämisen. Maalämpöpumppujärjestelmiä on monia erilaisia riippuen lämmönkeruujärjestelmän asennustavasta (Self, et al., 2012). Lämmönkeruujärjestelmä voi olla joko suljettu, jossa lämmönkeruuneste ei ole yhteydessä ympäristöön tai avoin, jossa lämmönkeruuneste on osa ympäristöä (Self, et al., 2012). Lisäksi lämmönkeruujärjestelmä voi olla yleisemmin esiintyvä vertikaalinen eli kaivomainen pystysuoraan maanpintaan nähden tai harvemmin esiintyvä horisontaalinen, jolloin lämmönkeruuputkisto on asennettu maanpinnan suuntaisesti vaakatasoon. Horisontaalinen lämmönkeruupiiri hyödyntää auringosta maaperän pintaan sitoutuneen lämpöenergian ja vertikaalinen lämmönkeruupiiri vastaavasti maan ytimeistä ja lämpimistä pohjavesivirtauksista tulevan lämpöenergian (Acuña, 2010). Tällä hetkellä Skandinaviassa yleisimmin käytössä on suljettu vertikaalinen energiakaivojärjestelmä, jossa U-putki on porattu pystysuoraan maanpintaan nähden lämmönkeruupiiriksi, jonka syvyys vaihtelee 80 – 350 metriin. (Eugster & Burkhard, 2007)

Energiakaivoja voi asentaa samaan järjestelmään myös useampia, jolloin niiden muodostama energiakaivokenttä toimii kokonaisuudessaan lämmönkeruupiirinä. Laajemmat energiakaivokentät ovat yleistyneet huomattavasti, kun maalämpöjärjestelmiä on alettu asentaa suurempiin rakennuksiin. Maaperän tutkimuksiin pitäisi kuitenkin enemmän käyttää resursseja ennen järjestelmän suunnittelua ja asentamista, jotta voitaisiin varmistua järjestelmän moitteettomasta ja optimaalisesta toiminnasta. (Eugster & Burkhard, 2007)

Maaperän lämpövuoto on merkittävä tekijä, joka vaikuttaa maalämmön tehokkaaseen hyödyntämismahdollisuuteen. Tänä päivänä on kehitetty jopa muutamien kilometrien syvyyteen soveltuvia kuuman kiven järjestelmiä, joilla voidaan hyödyntää maaperän lämpöenergiaa. Kuuman kiven tekniikka on paljon normaalia maalämpöjärjestelmää tehokkaampi, koska lämpötilat syvemmällä maaperässä ovat kuumempia. Suomessa valitettavasti kallioperän lämpötila on liian alhainen, jotta kuuman kiven tekniikkaa voitaisiin hyödyntää. Geologisen tutkimuslaitoksen tekemien mittauksien mukaan Suomen

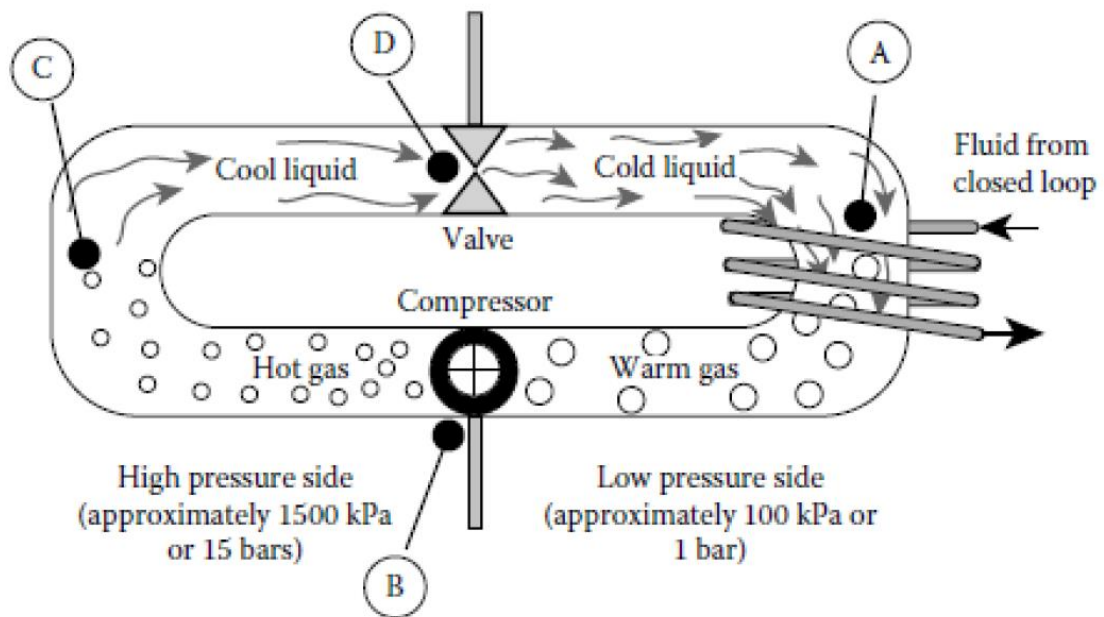
kallioperän lämpövuoto on keskimäärin vain 37 milliwattia neliötä kohden, kun mantereiden keskimääräinen kallioperän lämpövuoto on keskimäärin 65 milliwattia neliötä kohden. Kuumilla alueilla lämpövuoto voi nousta jopa yli 300 milliwattiin neliötä kohden. Lisäksi Suomessa kallioperä läpäisee huonosti vettä, kun sen huokoisuus on alle yhden prosentin. Veden kallioperänpäisykyky on yksi keskeinen ominaisuus, joka vaikuttaa merkittävästi maalämmön tehokkuuteen. Huonosta kallioperänpäisykyvystä huolimatta energiakaivoissa käytetään pohjavettä täyteaineena, koska pohjaveden liike mahdollistaa konvektiivisen lämmönsiirtymisen. (Rantanen, 2008)

2.1 Maalämpöpumppu

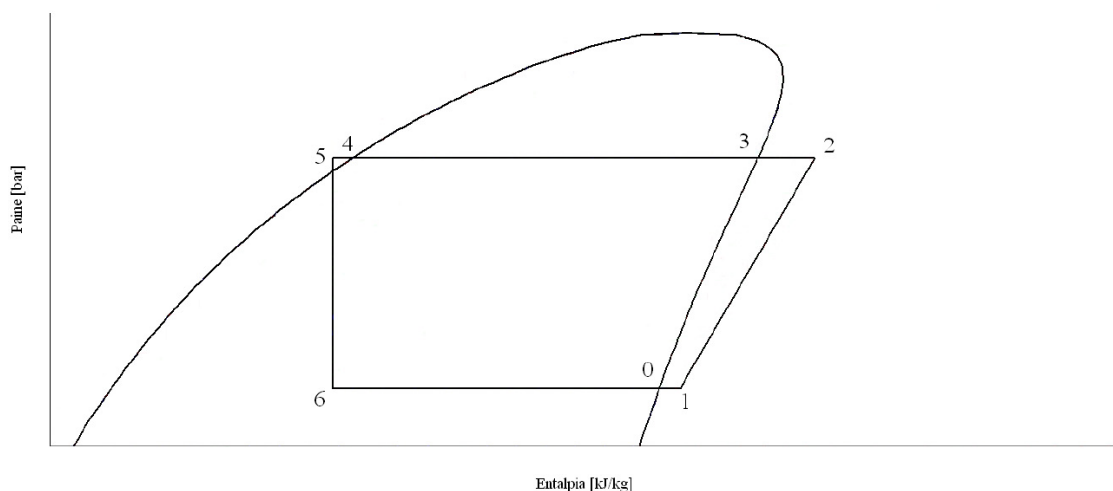
Lämpöpumppu on laite, joka siirtää lämpöenergiaa paikasta toiseen. Lämpöpumppu toimii Carnot-prosessin tavoin. Lämpöpumppuun pitää tuoda ulkopuolista sähköenergiaa, jotta se pystyy siirtämään lämpöenergian haluttuun paikkaan. Niin kuin johdannossa jo kerrottiin, lämpöpumpulla pystytään myös jäähdyttämään, jos käännetään Carnot-prosessi toisinpäin eli siirretään lämpöenergiaa rakenuksesta ulospäin. Tällöin lämpöpumppu toimii rakennuksen kylmäkoneena. (Glassley, 2010)

Lämpöpumpun toiminta perustuu kylmäaineen höyrystymisprosessiin, jossa lämpöpumpussa oleva kylmäaine vuoroin höyrystyy, puristuu, lauhtuu ja kuristuu. Lämpöpumpun kylmäaineen alhainen, alle $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ höyrystymislämpötila mahdollistaa alhaisten lämpötilojen lämpöenergian hyödyntämisen. Prosessissa kylmäaineen höyrystymiseen vaadittava lämpöenergia siirretään jäähtyvältä kohteelta lämmitettävään kohteeseen. Höyrystimeen nesteen ja kaasun sekoituksena saapuva kylmäaine höyrystyy jäähdytettävästä kohteesta siirrettävällä lämpöenergialla kylläiseksi tai tulistuneeksi höyryksi. Tämän jälkeen kylläinen höyry siirtyy puristimeen eli kompressoriin, jossa höyry viimeistään tulistuu eli höyryn lämpötila nousee. Ideaalisessa puristuksessa höyryn entropia pysyy vakiona. Puristuksen jälkeen höyrystä poistetaan tulistus, joka voidaan hyödyntää esimerkiksi lämpimän käyttöveden tuottamisessa. Tulistuksesta kerrotaan lisää myöhemmin tässä luvussa. Tulistuksen poiston jälkeen höyry johdetaan lauhduttimeen, jossa höyry kirjaimellisesti lauhtuu eli siirtää lämpöenergiansa lämmitettävään kohteeseen ja alkaa itse muuttumaan takaisin nesteeksi. Kylmäaine saattaa kuitenkin lauhduttimen jälkeen alijäähtyä. Lauhduttimesta kylmäaine johdetaan paisuntaventtiiliin, jossa kylmäaine kuristuu ja jäähtyy. Tämän jälkeen kylmäaine kulkee uudelleen höyrysti-

meen ja prosessi alkaa alusta. Lauhduttimesta saatava lämpöenergia voidaan hyödyntää esimerkiksi rakennuksen tai lämpimän käyttöveden tuottamisessa. Kuvassa 1 on esitetty lämpöpumpun höyryprosessi yksinkertaistettuna. Kuvassa 2 on vastaavasti esitetty erään kylmäaineen teoreettinen höyryprosessi entalpia-paine-tasossa. (Aittomäki, et al., 2012)



Kuva 1. Lämpöpumpun höyryprosessi yksinkertaistettuna. A) höyrystin, B) kompressor, C) lauhdutin ja D) kuristin. (Glassley, 2010)



Kuva 2. Erään kylmäaineen teoreettinen höyryprosessi entalpia-paine-tasossa. Vaihe 0-1 tulistuminen, 1-2 puristuminen kompressorissa, 2-3 tulistuksen poistaminen, 3-4 lauhtuminen, 4-5 alijäähtyminen, 5-6 kuristuminen ja 6-0 höyrystyminen.

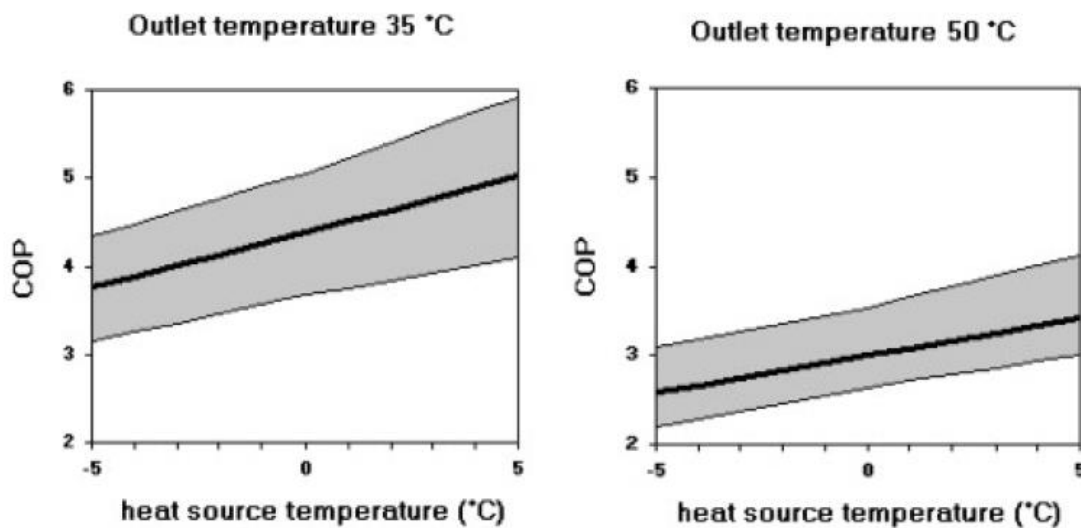
Maalämpöpumppu kirjaimellisesti siirtää lämpöenergiaa maasta rakennukseen sisälle tai jäähdyttäessään se siirtää lämpöenergiaa rakennuksen sisältä takaisin maahan. Tällöin lämpöpumppu tuottaa noin 2/3 lämmitysenergiasta maasta saatavalla energialla ja lopun 1/3 sähköllä. Lämpöpumpun sähkönkulutus aiheutuu lämmitysenergian tuoton energiankulutuksesta sekä lämpöpumpun apulaitteiden sähkönkulutuksesta. Näiden yhteenlaskettu energiamäärä on lämpöpumpulla tuotettava kokonaisenergia. Kun lämpöpumpulla tuotettua lämmitysenergiaa verrataan osaan, jonka lämpöpumppu tuottaa sähköllä, saadaan lämpöpumpulle laskettua vuosilämpökerroin (SPF-luku). SPF on lämpökerroin, jota voidaan käyttää vain, jos energiankulutus lasketaan koko vuoden lämmöntarpeesta. Suomessa maalämpöpumpun tyypillinen SPF-luku on 2,5 – 3,5 (Juvonen & Lapinlampi, 2013). Lisäksi maalämpöpumpulle voidaan laskea lämpökerroin COP (Coefficient of Performance), joka on lämpöpumpusta saatavan lämpötehon sekä kompressorin ja kiertopumpun kuluttaman sähkötehon suhde. Lämpökerroin COP määritellään yhtälössä (2.1) seuraavasti: (Eskola, et al., 2012) (Aittomäki, et al., 2012) (Laitinen, et al., 2014)

$$COP_{Heating} = \frac{Q_1}{E_{Komp} + E_{pump}} \quad (2.1)$$

, jossa Q_1 = Lämpöpumpun lauhdutinteho, E_{komp} = Kompressorin ottama sähköteho ja E_{pump} = Kiertopumppujen ottama sähköteho. (Acuña, 2010) (Laitinen, et al., 2014)

Lämpökerroin COP riippuu lämmönkeruupiiristä lämpöpumppuun sisälle tulevan lämmönsiirtonesteen lämpötilasta. Sisään tulevan lämmönsiirtonesteen lämpötila vastaavasti riippuu maaperän ja kallion geologisista ominaisuuksista, lämmönkeruupiirin materiaaleista ja tyypistä sekä energiakaivon täyteaineen laadusta. Muita tekijöitä, jotka vaikuttavat lämpökertoimeen, ovat lämpöpumpun lämmitys- ja jäähdytyskuormat, lämmityksen ja jäähdytyksen jakojärjestelmän tyyppi sekä jakojärjestelmän lämmönsiirtonesteen menolämpötilat. Menoveden lämpötilan nousu heikentää merkittävästi lämpökerrointa COP, mikä selviää kuvasta 3, jossa on esitetty lämpöpumpun lämpökerroin COP lämmönlähteen funktiona kahdella eri ulosmeno lämpötilalla. Maaperän ja kallion geologisten ominaisuuksien mukaan vastaavasti vertikaalinen kaivo on energiatehokkaampi verrattuna horisontaaliseen lämmönkeruupiiriin, sillä mentäessä yli kymmenen metrin

syvyyteen maaperän ja kallion lämpötila on lähes vakio ympäri vuoden. Maaperän ja kallion ominaisuuksista kerrotaan lisää kappaleissa 2.2 ja 2.3, joissa selvitetään energia-kaivojen lämmönsiirto-ominaisuuksia. (Sanner, et al., 2003)

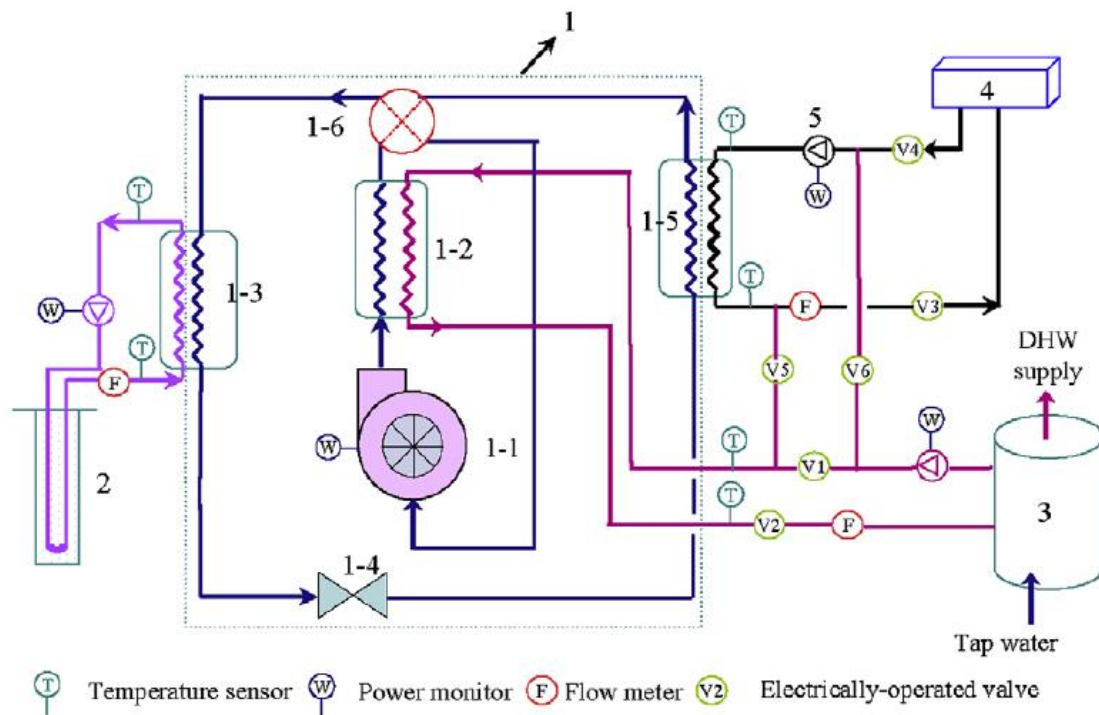


Kuva 3. Lämpöpumpun COP-lämpökerroin lämmönlähteen lämpötilan funktiona kahdella eri ulosmeno lämpötilalla. (Sanner, et al., 2003)

Lämpimän käyttöveden lämmittämiseen lämpöpumpun normaali höyryprosessi (esitetty kuvassa 1), ei välttämättä kuitenkaan riitä. Lämpimän käyttöveden lämmittämisen ongelmaan on sekä jäähdytyspainotteisessa että lämmityspainotteisessa maalämpöjärjestelmässä kehitetty tulistinlämmönvaihdin, jonka avulla pystytään lämpimän käyttöveden varaajaan tuottamaan määräyksien mukaista riittävän lämmintä käyttövettä. Tämä vaihe on edellä mainittu tulistuksen poistamisen vaihe. Kuva 4 havainnollistaa hyvin tulistinlämmönsiirtimen sisältävän maalämpöpumpun toimintaa. Jos tulistuslämmönvaihdinta ei olisi vielä kehitetty, jouduttaisiin lämmin käyttövesi tuottamaan jollain lisälämmittimellä, joka pystyy tuottamaan riittävän kuumaa vettä. Esimerkiksi jokin suorasähkölämmitin olisi tällöin vartenotettava vaihtoehto. Myös tässä tutkimuksessa käytetyissä simulointimenetelmissä lämpimän käyttöveden tuottamiseen joudutaan käyttämään lisälämmitystä. (Yang, et al., 2009)

Lämpöpumppu vaatii toimiakseen kylmäainepiirin lisäksi vähintään toisen suljetun kiertopiirin. Tämä piiri on lämmönkeruupiiri, jonka avulla pystytään lämpöenergia siirtämään maaperästä kylmäainepiirissä kiertävään kylmäaineeseen lämmönvaihtimen välityksellä lämpöpumpun höyrystimessä. Lämmönkeruupiirissä kiertää jäätymätön läm-

mönsiirtoneste, Pohjoismaissa yleensä vesi-etanoliliuos, joka kuljettaa lämpöenergian höyrystimeen. Lämmönkeruupiiri kulkee tässä tutkimuksessa kallioperässä, johon on porattu energiakaivoja. Keruupiiriin asennetaan kiertopumppu, joka kierrättää lämmönsiirtonestettä energiakaivojen sisällä kulkevassa keruupiirissä lämmönvaihtimen ja maan välillä. Kiertopumpun kuluttama sähköteho on juuri se teho, joka otetaan huomioon yhtälössä (2.1) lämpöpumpun lämpökerrointa määritettäessä. Lämmönkeruunesteseen sekoitetun etanolin tarkoitus on laskea liuoksen jäätymislämpötilaa. Näin voidaan estää lämmönkeruupiirin jäätyminen, vaikka maaperän tai kallion lämpötila laskisi energiakaivossa alle 0 °C. Lämmönkeruupiirin lisäksi maalämpöpumpputjärjestelmä sisältää hyvin usein myös kolmannen suljetun piirin, joka siirtää lauhduttimesta saadun lämmön energiavaraajaan. Energiavaraajan kautta kulkevat sekä rakennuksen lämmitysjärjestelmän jakopiiri että lämpimän käyttöveden esilämmityspiiri. (Acuña, 2010)



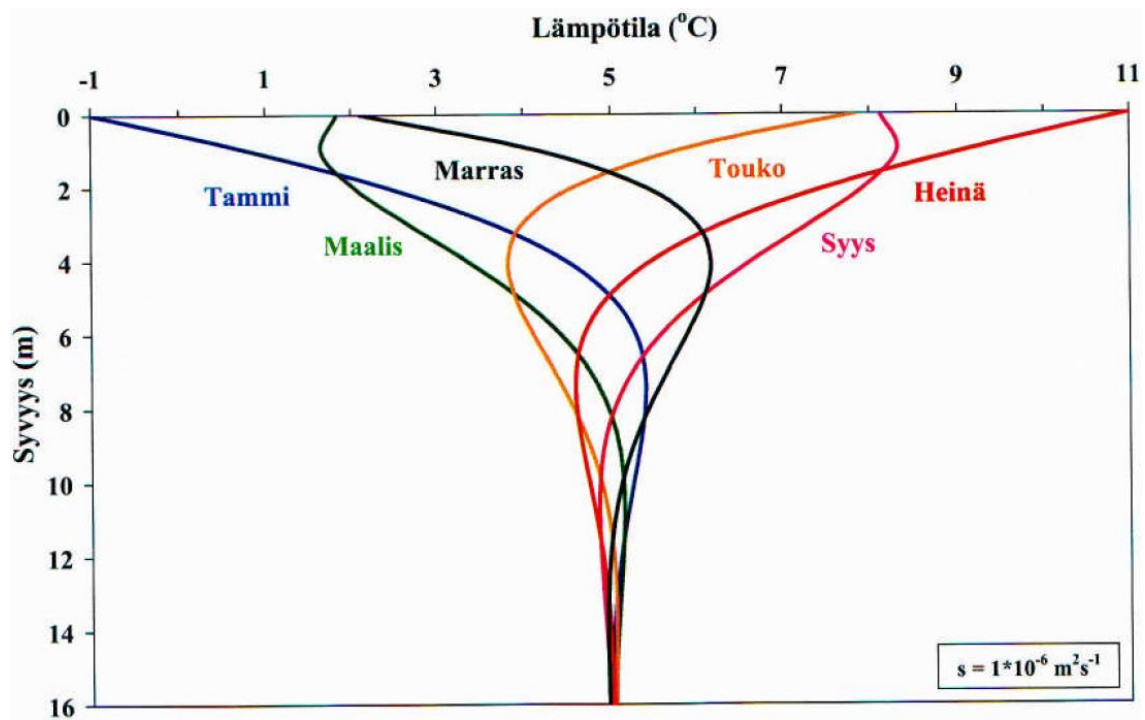
Kuva 4. Tulistinlämmönsiirtimeen sisältävä maalämpöjärjestelmä. (Yang, et al., 2009)

2.2 Maalämpö lämmönlähteenä

Maalämpö kostuu geotermisestä energiasta, joka syntyy syvällä maan sisällä. Geotermisen energia on peräisin maan ytimeä, jonka lämpötila on uusien tutkimuksien mukaan noin 6000 °C (Anzellini, et al., 2013). Ehtymätön geotermisen energia syntyy maapallon sisällä eikä ole riippuvainen auringosta tulevasta säteilyenergiasta. Maan ytimessä

syntyvä geoterminen energia johtuu maapallon pintaan, josta se lopulta siirtyy ilmakehään ja tämän kautta avaruuteen. Auringonsäteily lämmittää ainoastaan maapallon pintakerrosta, jossa se varastoituu maaperään, kallioon tai vesistöihin. Auringonsäteilyn energia ei ole kuitenkaan avuksi, jos halutaan kerätä maalämpöjärjestelmään tuleva lämpö vertikaalisella energiakaivolla. Auringonsäteilystä saatava lämpöenergia hyödynnetään parhaiten, jos lämmönkeruupiiri on horisontaalisesti maan pinnassa noin 1 – 2 metrin syvyydessä. Jos ajatellaan maapallon ilmakehän ulkopuolelle taseraja, tulee tämän taserajan läpi kulkea molempiin suuntiin yhtä paljon energiaa, jotta maapallo ei lämpenisi asuinkelvottomaksi. Näin ollen auringon säteilyenergiasta suurin osa poistuu takaisin avaruuteen. Auringon säteilyenergian takaisin avaruuteen pääsyn estää tulevaisuudessa kasvihuoneilmiö, jonka ihminen on omalla toiminnallaan aiheuttanut. (Glassley, 2010) (Rybach, 2012) (Omer, 2006)

Maapallon sisäinen geoterminen energia syntyy radioaktiivisista hajoamisista maapallon sisällä sekä maapallon syntymisestä, uuden maakuoren muodostumisesta ja maanjäristyksistä syntyvästä lämpöenergiasta. Geotermisen lämmön johtuminen maan pintakerrokseen mahdollistaa lämmön hyödyntämisen maanpinnalla. Maan keskilämpötila kasvaa kallioperässä noin 0,5 – 1,0 °C sataa metriä kohden johtuen geotermisen energian syntymisestä maan ytimessä. Tämän seurauksen Suomen eteläosissa kallioperän lämpötila 300 metrin syvyydessä maan pinnasta on noin 6,5 – 9,0 °C. Maanpinnalla lämpötila vaihtelee kuitenkin auringon säteilymäärän mukaan eli hyvin pitkälti vuodenaikojen mukaan. Auringon säteilyn vaikutusalue loppuu noin 10 – 15 metrin syvyydessä, mikä ilmenee hyvin kuvasta 5, jossa on esitetty maan lämpötila Celsius-asteina tarkastelupisteen syvyyden funktiona. (Juvonen & Lapinlampi, 2013)

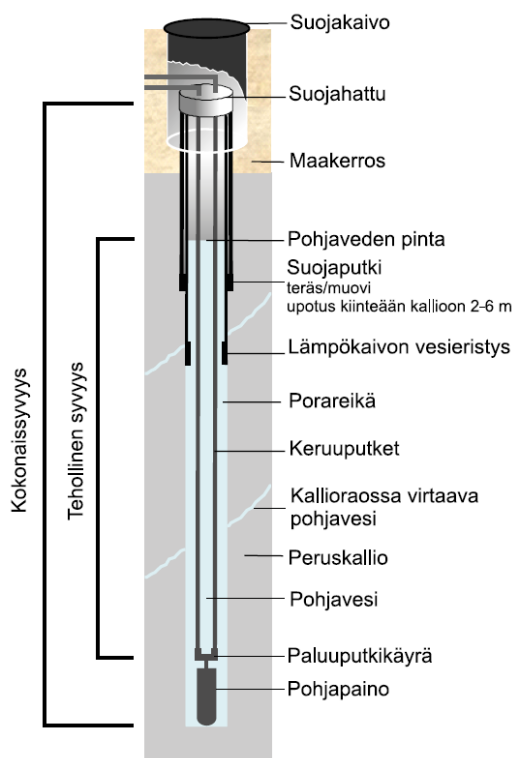


Kuva 5. Joka toisen kuukauden maaperän pintakerroksen lämpötila syvyyden funktiona. (Leppäharju, 2008)

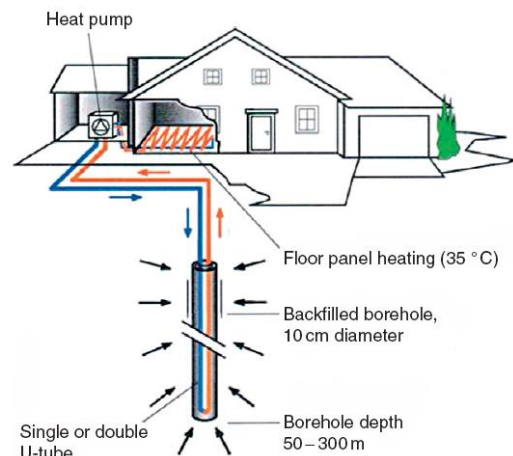
2.3 Energiakaivo

Energiakaivo on vertikaalinen eli pystysuoraan maaperään porattu kaivo, jonka avulla pystytään hyödyntämään geotermistä lämpöenergiaa. Energiakaivot ovat 50 – 350 metriä syviä, joissa kulkee erillinen suljettu tai avoin lämmönkeruupiiri. Lämmönkeruupiiri energiakaivossa voi olla joko U-putki tai koaksiaaliputki, joista Suomessa ja maailmalla suljettu U-putki on yleisemmin energiakaivossa käytetty putkimalli. Energiakaivot porataan syvälle kallioperään, jossa lämpötila on lähes vakio vuoden ympäri, eivätkä ilmastolosuhteet pääse vaikuttamaan maaperän lämpötilaan. Energiakaivossa oleva vakio­lämpötila on suuri etu esimerkiksi talvella, jolloin lämmöntarve rakennuksissa on huomattavasti suurempi kuin kesällä, jolloin auringonsäteilyä ei ole käytettävissä riittävästi. Lisäksi kesäaikaan vakio­lämpötilasta on hyötyä jäähdytykseen, kun ilman lämpötila on huomattavasti korkeampi kuin kallion lämpötila 200 metrin syvyydessä. Näin ollen viileämpi lämpötila energiakaivossa voidaan hyödyntää rakennuksen jäähdytykseen. Energiakaivoja ei kuitenkaan kannata porata tarpeettoman syvälle, sillä mitä syvemmälle porataan, sitä kalliimmat ovat porauskustannukset. (Acuña, 2010) (Glassley, 2010) (Juvonen, 2009) (Juvonen & Lapinlampi, 2013)

Suomessa energiakaivoja käytetään yli 60 % maalämpökohteissa. Energiakaivojen halkaisijat suomessa ovat yleensä 105 – 165 millimetriä. Energiakaivojen pienen koon vuoksi kaivot eivät vie paljon tilaa, mutta niitä ei saa kuitenkaan asentaa liian lähelle toisiaan, jottei maaperä rasittuisi liikaa. Maaperän liikarasittuminen saattaa aiheuttaa energiakaivojen toimimattomuutta. Energiakaivon toimintaan merkittävästi vaikuttaa lämmönkeruupiirin lisäksi energiakaivojen täyteaine ja lämmönkeruupiirissä käytetty lämmönsiirtoaine. Pohjoismaissa yleisin energiakaivon täyteaine on pohjavesi, joka automaattisesti täyttää energiakaivon porauksen jälkeen. Pohjavesi on myös edullisin vaihtoehto, koska tällöin ei tarvitse investoida mihinkään muuhun täyteaineeseen. Energiakaivon täytyy asentaa myös maanpinnan läheisyyteen suojaputki, joka estää pintamaan valumisen energiakaivon. Energiakaivon rakenne on esitetty kuvassa 6. Lisäksi kuvassa 7 on esitetty kuva energiakaivosta, joka on liitetty maalämpöjärjestelmään. (Acuña, 2010) (Glassley, 2010) (Juvonen, 2009) (Juvonen & Lapinlampi, 2013) (GTK, 2011)



Kuva 6. Energiakaivon rakenne. (Juvonen & Lapinlampi, 2013)



Kuva 7. Energiakaivo osana maalämpöjärjestelmää. (Rybach, 2012)

Energiakaivon asennettava suljettu lämmönsiirtopiiri koostuu lämmönsiirtoputkesta, lämmönsiirtonesteestä, lämpöpumpusta sekä lämmönsiirtimestä. Lämmönsiirtoputkisto voi olla joko U-putki- tai koaksiaaliputkijärjestelmä. Lämmönsiirtoputken materiaali on

järjestelmästä riippumatta yleensä valmistettu joustavasta muovista, esimerkiksi polyeteenistä. Polyeteeniputken lämmönjohtokyky on noin 0,42 W/mK. Muita mahdollisia mutta harvemmin käytettyjä lämmönsiirtoputkimateriaaleja ovat ruostumaton teräs, kupari, PVC ja muuntyyppiset muovit. (Acuña, 2013) (Acuña, 2010)

Lämmönsiirtoputkilta vaaditaan erilaisia ominaisuuksia energiakaivossa, kuten pientä lämmönvastusta, mahdollisimman pientä sisäänmeno- ja ulostuloputkien välistä haitallista lämmönsiirtoa sekä lämmönsiirtoaineen riittävän pitkää kaivossaoloaika. Näihin ominaisuuksiin pystytään vaikuttamaan lämmönsiirtonesteen virtausnopeutta säätämällä. Lisäksi lämmönsiirtoputkistoon voidaan tehdä urat parantamaan lämmönsiirtoa putkessa liikkuvan lämmönsiirtonesteen ja polyeteenin välillä. Lämmönsiirtoputkistossa liikkuvaan lämmönsiirtonesteen tarkoitus on sitoa energiakaivosta mahdollisimman paljon lämpöenergiaa tai jäähdytysaikana luovuttaa mahdollisimman paljon lämpöenergiaa. Lämmityskaudella lämmönsiirtoneste lämpiää lämmönsiirtoputkistossa energiakaivossa olemisen aikana muutamia Celsius-asteita. Vastaavasti jäähdytyskauden aikana lämmönsiirtoneste jäähtyy muutamia Celsius-asteita. (Acuña, 2013) (Acuña, 2010)

U-putkijärjestelmässä energiakaivoon asennetaan U-putki, jossa U-putken mutkassa on paino, jonka tarkoitus on painaa U-putken mutka kaivon pohjalle. U-putkia voidaan asentaa yhteen energiakaivoon myös kaksi eli tällöin puhutaan kaksois-U-putkesta. Myös ratkaisu, jossa asennetaan kaksi sisäänmenoputkea ja yksi ulostuloputki on mahdollinen. U-putken useimmin esiintyvä malli on ulkohalkaisijaltaan 40 mm ja putken materiaaliipaksuudeltaan 2,4 mm. Tällöin U-putken malli on PE40 x 2,4mm. Kuvassa 9 on esitetty U-putken pituus- ja poikkileikkaukset. (Acuña, 2013) (Acuña, 2010)

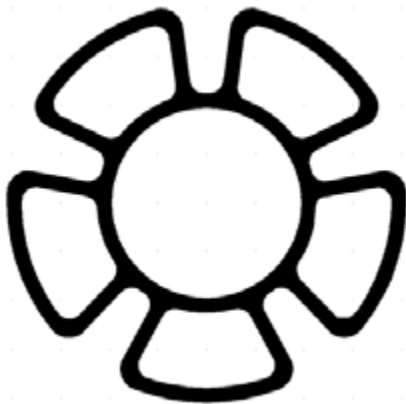
U-putkella on kohtuullisen suuri lämpövastus, joten energiakaivossa kallion seinämän ja U-putken välinen lämpötilaero on verrattain suuri. Suurta lämpötilaeroa ei ainakaan paranna Pohjoismaissa energiakaivon täyteaineena käytetty pohjavesi, sillä veden lämmönjohtamiskyky ei ole kovin hyvä. Energiakaivon täyteaineena lämmönjohtumisen kannalta parempia olisivat kiinteät aineet. Kiinteitä energiakaivon täyteaineita ovat muun muassa betoniitti, betoni ja kvartsihiekkä, joita käytetään myös, jos energiakaivo ei kuitenkaan täyty pohjavedellä yrityksistä huolimatta. Kiinteitä täyteaineita energiakaivoissa käytetään erityisesti Keski-Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa. On olemassa myös seosaineita, joilla pystytään edistämään lämmönsiirtymistä lämmönsiirtonesteseen. Pohjaveden etu energiakaivon täyteaineena on kuitenkin se, että tällöin lämpö-

energia siirtyy myös luonnollisella konvektiolla, kun kiinteässä täyteaineessa taas lämpöenergia siirtyy ainoastaan johtumalla. Tutkimuksissa on selvitetty, että luonnollinen konvektio on heikkoa matalilla lämpötiloilla, mutta korkeammilla lämpötiloilla luonnollisen konvektion seurauksena on saatu energiakaivon 3 – 5 kertaa suurempi lämmönsiirtyminen kuin seisovassa täytevedessä. (Acuña, 2013) (Acuña, 2010) (Hellström, 1998)

Lämmön siirtymistä lämpökaivosta edistetään säätelämällä lämmönsiirtonesteen nopeutta lämmönsiirtoputkessa. Lämmönsiirtonesteen virtaus pyritään pitämään koko ajan turbulenttisena, jotta lämmönsiirto lämmönsiirtoputken sisäpinnalta lämmönsiirtonesteeseen olisi parhaimmillaan. Jos lämmönsiirtonesteen virtaus muuttuu laminaariseksi, heikkenee lämmönsiirtyminen lämmönsiirtoputken sisäpinnalta lämmönsiirtonesteeseen huomattavasti. Virtausnopeuden säätelyn lisäksi lämmönsiirtoputkiston ja energiakaivon välistä lämmönsiirtoa pyritään usein parantamaan U-putken sisäänmeno- ja ulostuloputken väliin asennettavalla tukikappaleella (Leppäharju, et al., 2010). Tukikappaleen tarkoitus on pitää putkihaarat mahdollisimman kaukana toisistaan, jotta putkien välinen haitallinen lämmönsiirtyminen minimoituisi. Lisäksi tukikappale vie putkihaarat lähelle energiakaivon seinämiä, mikä taas pienentää energiakaivon lämpövastusta. Etenkin syvemmissä kaivoissa putkihaarojen välinen tukikappale on elintärkeä, koska U-putken pidentyessä myös lämmönsiirto putkihaarojen välillä voimistuu. Ei saa myöskään unohtaa energiakaivon halkaisijan merkitystä, sillä mitä pienempi on energiakaivon halkaisija, sitä vähemmän energiakaivossa on lämmönsiirto-ominaisuuksiltaan heikkoa pohjavettä. (Acuña, 2013) (Acuña, 2010) (Hellström, 1998)

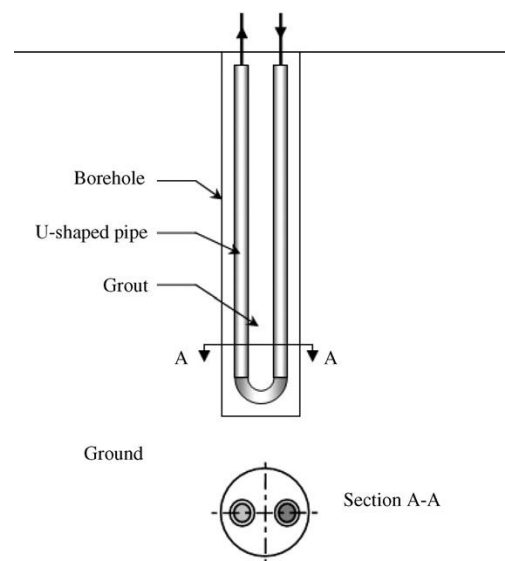
Toinen mahdollinen lämmönsiirtoputkisto on koaksiaaliputki, josta on kehitetty erilaisia prototyyppiejä. Ensimmäinen prototyyppi koostui yhdestä eristetystä sisäänmenon keskusputkesta ja useasta ulostulotuloputkesta, jotka kulkevat keskusputken ulkopuolella. Tämän jälkeen on muun muassa kehitetty prototyyppi, jossa on yksi keskuskanava ja tämän ulkopuolella kulkee viisi ulompaa puolisuunnikkaan muotoista kanavaa. Koaksiaaliputken etuja ovat koaksiaaliputken paremmat termiset ominaisuudet sekä pienempi paineenpudotus lämmönsiirtokanavassa, perustuen laminaariseen virtaukseen. U-putkessa virtaus pitää olla turbulenttista paremman lämmönsiirron vuoksi, mutta koaksiaaliputkessa laminaarinen virtaus on riittävä. Laminaarinen virtaus vaatii pienemmän pumppaustehon, mikä on koaksiaaliputken etu. Kuvassa 8 on esitetty koaksiaaliputken

poikkileikkaus, jossa näkyy hyvin keskuskanava ja ulommat kanavat. (Acuña, 2010)
(Florides & Kalogirou, 2006)



Kuva 8. Koaksiaaliputken poikkileikkaus.

(Acuña, 2010)



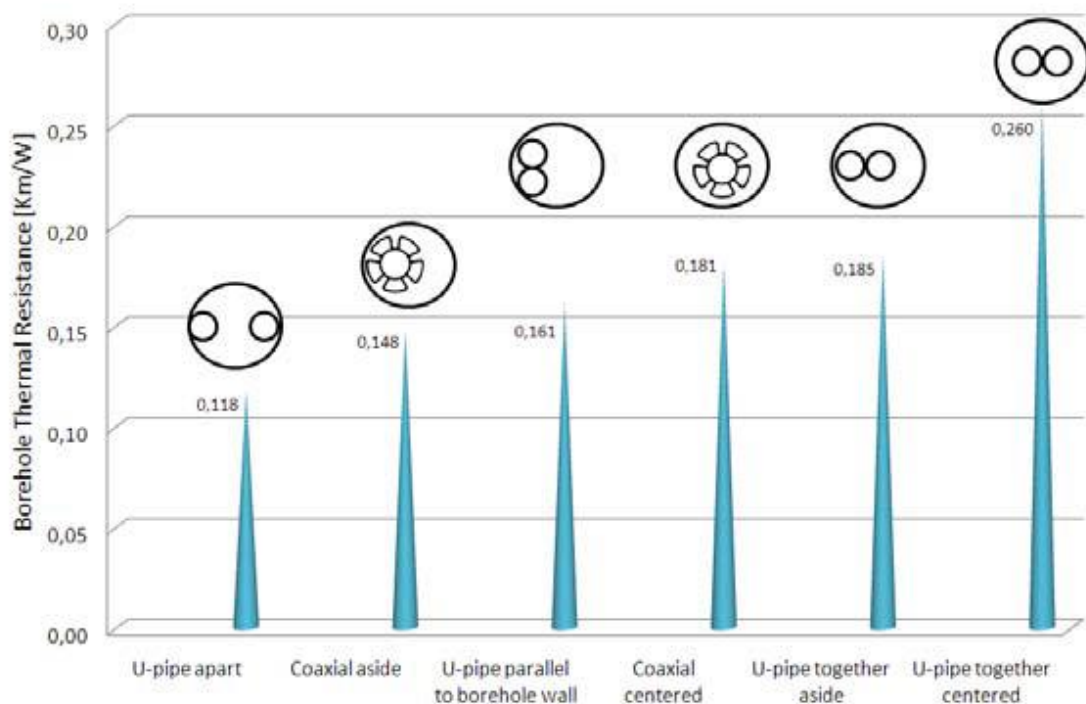
Kuva 9. U-putken pituus- ja poikkileikkaus. (Shargawy, et al., 2009)

U-putken ja Koaksiaaliputken lämmönsiirto-ominaisuuksia on testattu ja verrattu toisiinsa tutkimuksissa. Eräässä tutkimuksessa testattiin ja verrattiin ulkohalkaisijaltaan 20 mm U-putken ja vanhan mallisen koaksiaaliputken ominaisuuksia energiakaivossa. Jälkimmäisessä ulkoputken halkaisija oli 40 mm ja sisäputken halkaisija 20 mm, ominaisuuksia energiakaivossa. Tutkimuksen tulokseksi saatiin, että koaksiaaliputkessa oli kaikilla eri lämmönsiirtonesteen virtausnopeuksilla pienempi paineenpudotus kuin U-putkessa. Koaksiaaliputken virtaus pysyi kaikilla eri virtausnopeuksilla laminaarisena, joten tutkimuksessa ei selvinnyt, kuinka paljon lämmönsiirtyminen energiakaivosta lämmönsiirtonesteeseen olisi parantunut, jos lämmönsiirtonesteen virtaus olisi muuttunut turbulenttiseksi. Virtaus olisi voitu säätää turbulenttiseksi, mutta tällöin pumppaus-teho olisi suurempi, mikä taas huonontaisi koko järjestelmän lämpökerrointa. (Acuña, 2013) (Acuña, 2010)

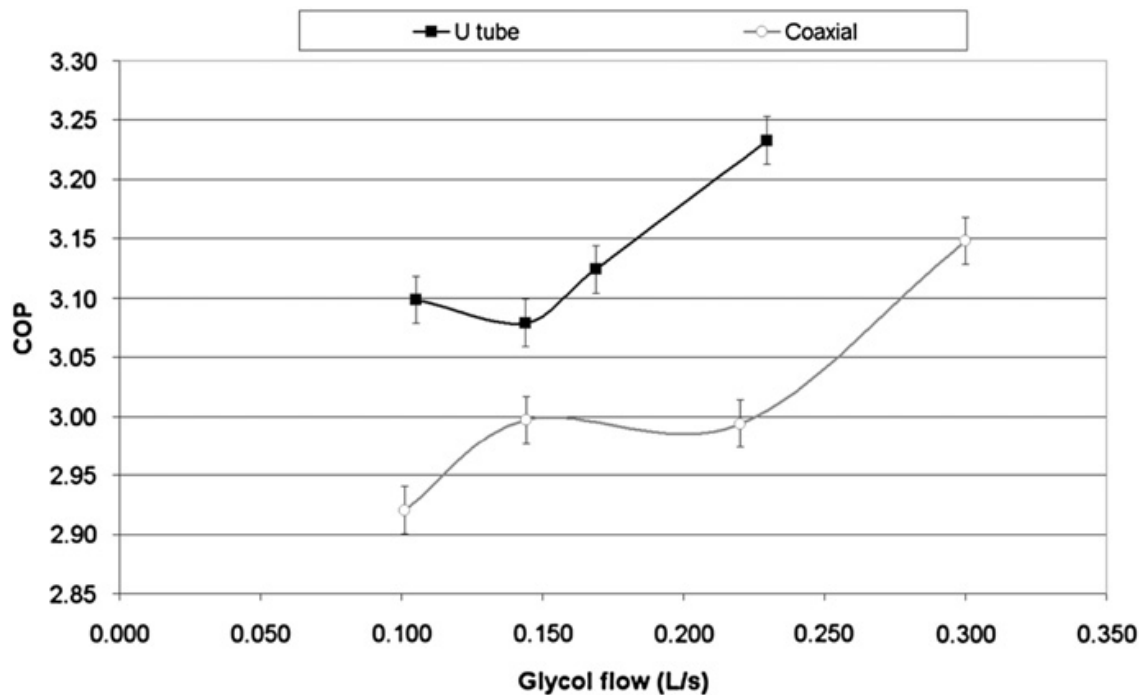
Tutkimuksen U-putkessa lämmönsiirtonesteen virtaus muuttui turbulenttiseksi jo huomattavasti pienemmällä virtauksella. Tästä seuraa merkittävä parannus U-putken lämpöenergian ulossiirtoon putkesta sekä parannus koko järjestelmän COP-lämpökertoimeen. Koaksiaaliputkijärjestelmässä COP ei vastaavalla tavalla nouse yhtäkkiä, koska koaksiaaliputkessa lämmönsiirtonesteen virtaus ei missään vaiheessa muutu turbulenttiseksi. Näin ollen koaksiaaliputken suunnittelu lämmönsiirto-putkistoksi ei

anna ainakaan vielä mitään etua verrattuna U-putkeen, vaikka koaksiaaliputken suunnittelussa on paljon potentiaalia vähentää porauskustannuksia ja tehdä energiakaivon asennustyöt helpommaksi. (Acuña, 2013) (Acuña, 2010)

Kuvassa 10 on vertailtu eri tavoin energiakaivoon asennettujen U-putkien ja koaksiaaliputkien lämpövastuksia. Kuvasta nähdään, että pienin lämpövastus saadaan aikaiseksi, jos asennetaan U-putket ihan energiakaivon seinämiin kiinni. Energiakaivon seinään kiinniasennettu koaksiaaliputki ei kuitenkaan aiheuta paljon isompaa lämpövastusta energiakaivoon. Vastaavasti kuvassa 11 on esitetty U-putken ja koaksiaaliputken ominaisuuksien vertailututkimuksen molempien järjestelmien lämpökertoimet lämmönsiirtonesteen eri tilavuusvirroilla. (Acuña, 2013) (Acuña, 2010) (Wood, et al., 2011)



Kuva 10. Lämmönvastusvertailu eri tavoin energiakaivoon asennettujen U-putki ja Koaksiaaliputkien välillä. (Acuña, 2010)



Kuva 11. Tutkimuksen tuloksena saatu maalämpöjärjestelmien COP lämmönsiirtonesteen tilavuusvirran funktiona. Lämmönsiirtoputkina tutkimuksessa käytettiin U- ja koaksiaaliputkea. (Wood, et al., 2011)

2.4 Lämmön siirtyminen energiakaivossa

Lämmön siirtyminen energiakaivossa tapahtuu sekä johtumalla että luonnollisella konvektiolla. Luonnollisella konvektiolla lämpösiirtyminen tapahtuu lämmönsiirtoputkesta lämmönsiirtonesteeseen ja maaperästä täyteaineeseen, jos täyteaine on liikkuvaa pohjavettä. Jos energiakaivon täyteaine on kiinteää materiaalia, lämmön siirtyminen maaperän ja täyteaineen välillä tapahtuu ainoastaan johtumalla. Myös muiden kuin edellä mainittujen energiakaivon osien välillä lämmön siirtyminen tapahtuu johtumalla. (Nabi & Al-Khoury, 2012) (Nabi & Al-Khoury, 2012)

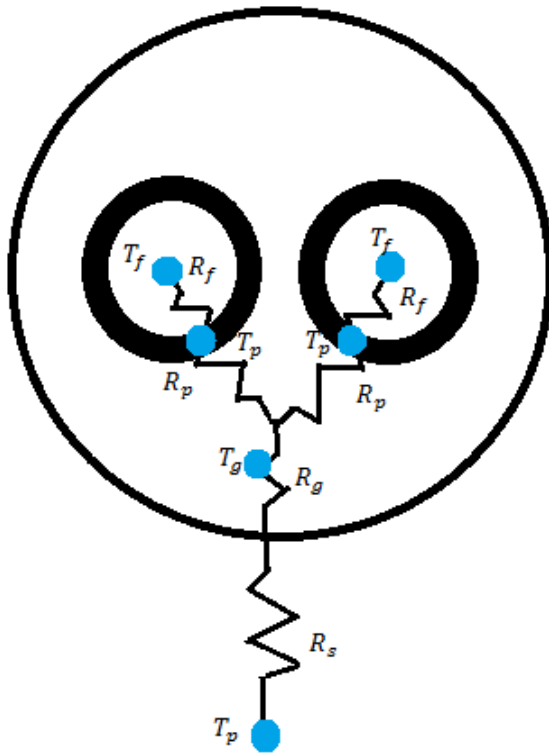
Lämmönsiirtymistehoa heikentävät lämpövastukset eri aineissa ja materiaaleissa sekä näiden rajapinnoissa. Lämpövastuksien määrittäminen etenkin energiakaivoja mitoitettaessa on tärkeää, jotta voidaan välttää ei-toivotut ilmiöt maalämpöjärjestelmän toiminnassa esimerkiksi energiakaivokentän jäätyminen. Lämpövastuksien määrittämiseen on kehitetty useita tapoja, jotka voidaan jakaa kolmeen pääryhmään: kokeelliseen, analyttiseen tai numeeriseen sekä lämpöpiiriin. Kokeellista tapaa edustaa esimerkiksi TRT-testi, joka on esitelty kappaleessa 3.1. Analyttinen ja numeerinen sekä lämpöpiiri esi-

tellään alaotsikoiden 2.4.1, 2.4.3 ja 2.4.4 alla. (Nabi & Al-Khoury, 2012) (Nabi & Al-Khoury, 2012)

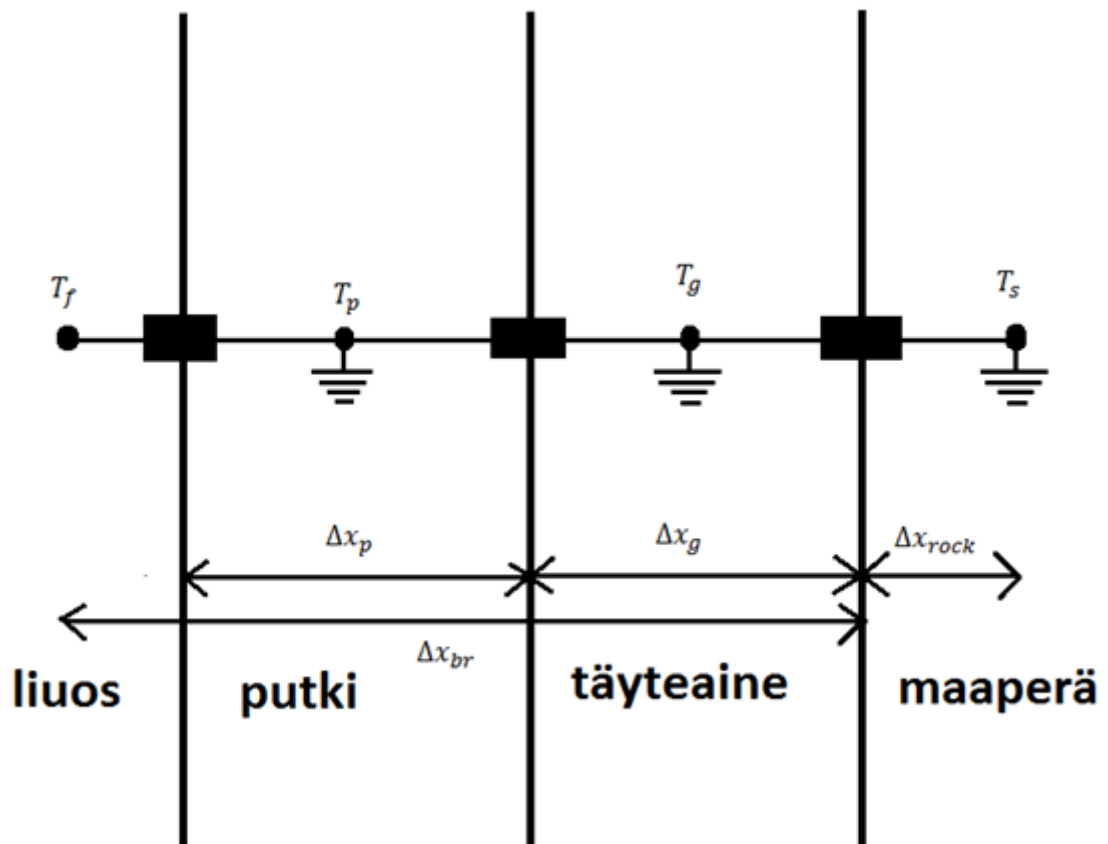
2.4.1 Lämpötaseet energiakaivossa lämpöpiirimenetelmällä

Tutkimuksen kohteessa lämmönsiirtoputkeksi valittiin U-putki, joten seuraavat lämpötaseyhtälöt ja muut määritelmät liittyvät kaikki U-putkiratkaisuun. Kuvissa 12 ja 13 on esitetty energiakaivon ja maaperän solmupisteet ja näiden muuttujat. Energiakaivon eri osien lämpötaseet ja reunaehdot on määritetty tämän jälkeen. Lämpötaseet on esitetty maaperälle, täyteaineelle, lämmönsiirtoputkelle ja lämmönsiirtonesteelle. Lämpötaseet määrittävät lämpöenergian siirtymisen lämmönsiirtonesteen ja maaperän välillä. Lisäksi oletetaan, ettei täyteaine liiku kaivossa, jolloin voidaan konvektiivinen lämmönsiirto jättää ottamatta huomioon lämpöenergian siirtyessä täyteaineen läpi.

Lämpötaseiden ja lämpövastuksien määrittämisessä hyödynnetään lämpöpiirimenetelmää. Lämpöpiirimenetelmässä U-putken lämpövastus voidaan kuvata yksinkertaisesti sähkö- tai lämpöpiirianalogiaa hyödyntämällä. Lämpöpiirit voidaan kuvata joko Y-kytkentänä tai Delta-kytkentä. Kytkentöjen ero lämmönsiirtymisen kannalta on, että Y-kytkennässä ei oteta huomioon sisäänmenoputken ja ulosmenoputkien välistä lämmönsiirtoa ja Delta-kytkennässä vastaavasti ei oteta täyteainetta huomioon. Käytetään tässä määrittelyssä Y-kytkentää, joka on esitetty kuvassa 12. Tämän jälkeen lyhyesti esitetään Delta-kytkennän lämpövastukset.



Kuva 12. Y-kytkentä solmupisteineen.



Kuva 13. Energiakaivon ja maaperän solmupisteet U-putken yhdestä haarasta maaperään.

Lämmönsiirtoliuoksen lämpötase määritetään seuraavalla tavalla:

$$\dot{q}_s = \frac{\dot{m}c_{r,f}}{z}(T_o - T_i) = H_{pf}(T_p - T_f), \quad (2.2)$$

jossa \dot{q}_s on lämpövirtaus lämpökaivon syvyys metriä kohden, z energiakaivon syvyys, \dot{m} U-putkessa kulkevan lämmönsiirtonesteen massavirta, c_r U-putkessa kulkevan lämmönsiirtonesteen ominaislämpökapasiteetti, T_o U-putkesta ulos virtaavan lämmönsiirtonesteen lämpötila, T_i U-putken sisään virtaavan lämmönsiirtonesteen lämpötila, H_{pf} konduktanssi lämmönsiirtonesteestä U-putkimateriaalin keskipisteeseen ja T_p U-putken lämpötila. (Cengel & Ghajar, 2006)

Yhtälön (2.2) muuttuja T_f on lämmönsiirtonesteen keskilämpötila, joka määritetään seuraavasti:

$$T_f = \frac{T_i + T_o}{2}. \quad (2.3)$$

Yhden U-putkihaaran vastus on $R_{pf,haara} = R_f + R_{p,sisä}$. Mutta kun vastuksien kannalta tarkasteltuna putkihaaroja on kaivossa kaksi rinnan, pitää vastukselle molemmista haaroista R_{pf} määrittää arvo. Rinnan asennettujen vastuksien yhtälö on esitetty yhtälössä (2.4) seuraavalla tavalla:

$$R_{pf} = \frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_{p,sisä}} + \frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_{p,sisä}} = \frac{2}{R_f} + \frac{2}{R_{p,sisä}} \quad (2.4)$$

$$\text{jossa } R_f = \frac{1}{2\pi r_p h} \text{ ja } R_{p,sisä} = \frac{\ln \left(\frac{r_{ext} - \left(\frac{r_{ext} - r_p}{2} \right)}{r_p} \right)}{2\pi \lambda_{pipe}}. \quad (2.5), (2.6)$$

Yhtälöissä (2.5) ja (2.6) r_{ext} on lämmönsiirtoputken ulkosäde ja r_p sisäsäde. λ_{pipe} on lämmönsiirtoputken lämmönjohtavuus ja h on lämmönsiirtoputken sisäpuolen konvektiivinen lämmönsiirtokerroin. Tämän jälkeen määritetään konduktanssi H_{pf} yhtälönä (2.7), joka saa seuraavan muodon:

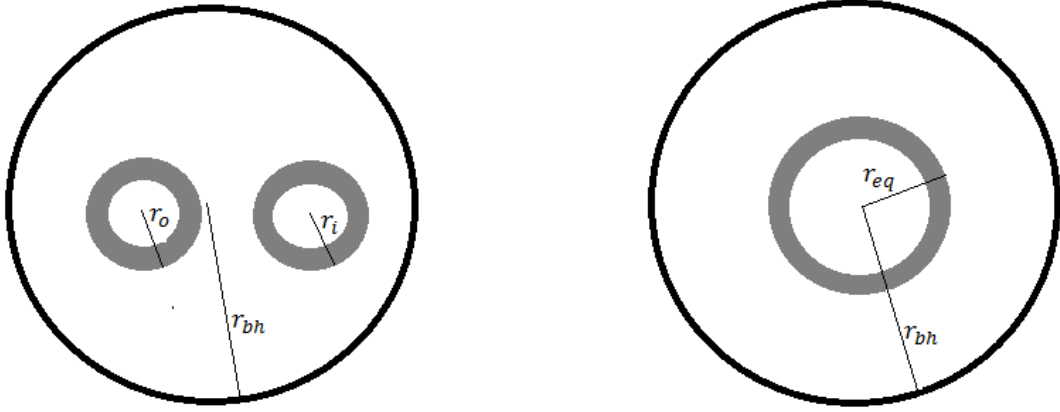
$$H_{pf} = \frac{1}{R_{pf}}, \quad (2.7)$$

Konduktanssissa H_{pf} on huomioitu lämmönsiirtonesteen ja lämmönsiirtoputken sisäpinnan välinen lämpövastus sekä lämmönsiirtoputken puoleenväliin asti lämmönjohtumisvastus molemmista U-putkihaaroista.

Putken lämpötaseen yhtälö määritellään seuraavasti:

$$C_p \frac{dT_p}{dt} = H_{gp} (T_g - T_p) + H_{pf} (T_f - T_p), \quad (2.8)$$

jossa C_p on putken lämpökapasiteetti, T_p putken lämpötila, t aika, H_{gp} täyteaineen ja putken välinen konduktanssi, T_g täyteaineen lämpötila, H_{pf} lämmönsiirtonesteen ja putken välinen konduktanssi ja T_f lämmönsiirtonesteen keskilämpötila. Konduktanssi H_{pf} on määritelty yhtälössä (2.7), ja H_{gp} määritellään yhtälössä (2.9). Jotta konduktanssi H_{gp} voidaan määrittää pitää ensin määrittää vastus R_{gp} , mikä on esitetty yhtälössä (2.10). Täyteaineen vastuksia määrittäessä yksinkertaistetaan energiakaivon rakennetta, ja muutetaan U-putken haarat yhdeksi putkihaaraksi kuvassa 14 esitetyllä tavalla. Muutos voidaan suorittaa muuttamalla U-putken haarat yhdeksi putkeksi, jonka poikkipinta-ala on haarojen poikkipinta-alojen summa. Muutoksessa hyödynnetty kaava on esitetty yhtälössä (2.13).



Kuva 14. U-putkihaarojen muutos yhdeksi suuremmaksi putkeksi yhtälöiden yksinkertaistamiseksi.

Kohduktanssi H_{gp} määritetään alla olevalla tavalla:

$$H_{gp} = \frac{1}{R_{gp}}, \quad (2.9)$$

$$\text{jossa } R_{gp} = R_{gp, sisä} + \frac{1}{R_{p, ulko}} + \frac{1}{R_{p, ulko}} = R_{gp, sisä} + \frac{2}{R_{p, ulko}} \quad (2.10)$$

$$\text{jossa } R_{g, sisä} = \frac{\ln \left(\frac{r_{g, ulko} - \left(\frac{r_{g, ulko} - r_{eq}}{2} \right)}{r_{eq}} \right)}{2\pi\lambda_g} \text{ ja} \quad (2.11)$$

$$R_{p, ulko} = \frac{\ln \left(\frac{r_{ext}}{r_{ext} - \left(\frac{r_{ext} - r_p}{2} \right)} \right)}{2\pi\lambda_{pipe}}. \quad (2.12)$$

Yhtälöissä (2.11) - (2.12) $r_{g,ulko}$ on täyteaineen ulkosäde energiakaivon keskikohdasta, λ_g täyteaineen lämmönsiirtokerroin, r_{ext} U-putken ulkosäde ja r_{eq} määritellään alla olevassa yhtälössä (2.13) seuraavalla tavalla:

$$r_{eq} = \sqrt{r_{in}^2 + r_{out}^2} \quad (2.13)$$

jossa r_{in} on sisäänmenoputken säde ja r_{out} ulosmenoputken säde. (Nabi & Al-Khoury, 2012)

Täyteaineen lämpötase määritellään seuraavasti:

$$C_g \frac{dT_g}{dt} = H_{sg} (T_s - T_g) + H_{gp} (T_p - T_g), \quad (2.14)$$

jossa C_g on täyteaineen lämpökapasiteetti, T_p putken lämpötila, t aika, H_{gp} täyteaineen ja putken välinen konduktanssi, T_g täyteaineen lämpötila, H_{sg} maaperän ja täyteaineen välinen konduktanssi ja T_s maaperän lämpötila. Konduktanssi H_{gp} on määritelty yhtälössä (2.9) ja H_{sg} määritellään alla olevassa yhtälössä (2.15):

$$H_{sg} = \frac{1}{R_{sg}}, \quad (2.15)$$

$$\text{jossa } R_{sg} = R_{gp,ulko} + R_{rock}, \quad (2.16)$$

$$\text{jossa } R_{g,ulko} = \frac{\ln \left(\frac{r_{g,ulko}}{r_{g,ulko} - \left(\frac{r_{g,ulko} - r_{eq}}{2} \right)} \right)}{2\pi\lambda_g} \text{ ja } R_{rock} = \frac{\ln \left(\frac{r_{rock}}{r_{bh}} \right)}{2\pi\lambda_{rock}}. \quad (2.17), (2.18)$$

Yhtälöissä (2.17) - (2.18) $r_{g,ulko}$ on täyteaineen ulkosäde energiakaivon keskikohdasta, λ_g täyteaineen lämmönsiirtokerroin, λ_{rock} maaperän lämmönsiirtokerroin, r_{rock} maaperän säde, joka rajaa lämpökaivon vaikutusalueen, r_{bh} lämpökaivon säde ja r_{eq} määriteltiin yhtälössä (2.13).

Maaperän lämpötaseen määritelmä on seuraavanlainen:

$$C_s \frac{dT_s}{dt} - H_{sg} (T_g - T_s) = 0, \quad (2.19)$$

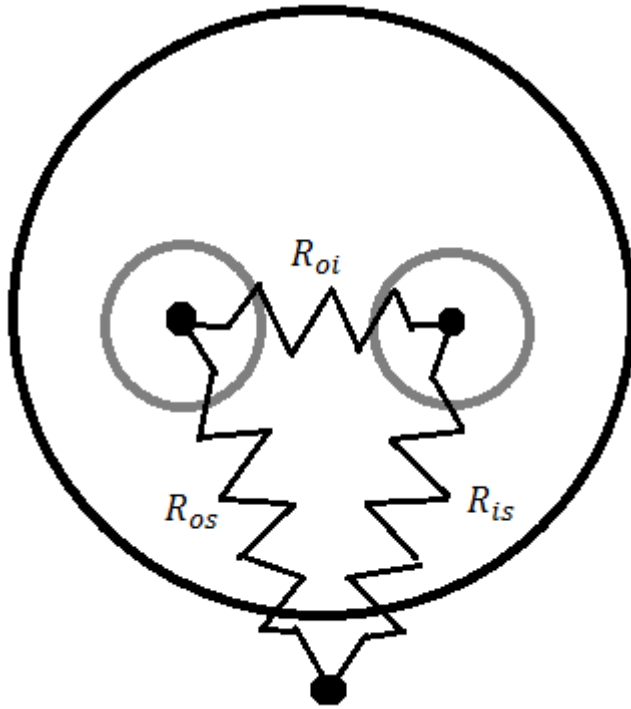
jossa C_s on maaperän lämpökapasiteetti, t aika, T_g täyteaineen lämpötila, H_{sg} maaperän ja täyteaineen välinen konduktanssi ja T_s maaperän lämpötila. Konduktanssi H_{sg} on määritelty yhtälössä (2.15).

Lämpötaseyhtälöiden reunaehtoja ovat muuttujat T_o , T_i , z ja \dot{m} , jotka pitää tuntea, jotta lämpötaseiden yhtälöt voidaan ratkaista. Lisäksi lämpötaseyhtälöissä esiintyvä lämpökapasiteetti C pitää tuntea. Lämpökapasiteetti C määritetään yleisesti seuraavasti

$$C = \rho c_r V, \quad (2.20)$$

jossa ρ on tiheys, c_r ominaislämpökapasiteetti ja V tilavuus.

Delta-kytkennässä U-putken sisäänmenohaara, ulosmenohaara ja maaperä ovat suorassa termisessä vuorovaikutuksessa toistensa kanssa, ja näin ollen nämä eivät ole olenkaan vuorovaikutuksessa täyteaineen kanssa. Delta-kytkennästä käsityksen antaa kuva 15, jossa on esitetty Delta-kytkennän vastukset ja solmupisteet.



Kuva 15. Delta-kytkentä.

Delta-kytkennässä energiakaivon lämmönvastus saadaan laskettua seuraavasta yhtälöstä (2.21): (Al-Khoury, 2012) (Acuña, 2010)

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{oi}} + \frac{1}{R_{os} + R_{is}} \rightarrow R = \frac{R_{oi}(R_{os} + R_{is})}{R_{os} + R_{is} + R_{oi}}. \quad (2.22)$$

Energiakaivon lämpövastuksen voi määrittää myös alla esitetyllä tavalla:

$$R_b = \frac{(T_f - T_{bhw})}{q'}, \quad (2.23)$$

jossa T_f on lämmönsiirtonesteen keskilämpötila, T_{bhw} on energiakaivon seinän lämpötila ja q' on lämmönsiirto pituusyksikköä kohden lämmönsiirtoaineen ja energiakaivon seinän välillä. (Acuña, 2010) (Lamarche, et al., 2010)

2.4.2 Yhdestä U-putkienergiakaivosta saatava lämpö- ja jäähdytysteho

Energiakaivosta saatava lämpöteho perustuen U-putken sisäiseen pakotettuun konvektioon voidaan laskea kahdella eri oletuksella. Toisessa tavassa oletetaan U-putkeen koh-

distuva lämpövirtaus q_s vakioksi ja toisessa putken pinnan lämpötila T_p vakioksi. Jos U-putkeen kohdistuva lämpövirtaus oletetaan vakioksi, saadaan energiakaivosta saatavan lämpö- tai jäähdytystehon kaavaksi alla esitetty yhtälö (2.24): (Cengel & Ghajar, 2006)

$$\dot{Q} = \dot{q}_s A_s = \dot{m} c_r (T_o - T_i), \quad (2.24)$$

jossa \dot{Q} on lämpö- tai jäähdytysteho energiakaivosta, \dot{q}_s lämpövirtaus U-putken pinnan neliötä kohden, A_s U-putken pinnan pinta-ala, \dot{m} U-putkessa kulkevan lämmönsiirtonesteen massavirta, c_r U-putkessa kulkevan lämmönsiirtonesteen ominaislämpökapasiteetti, T_o U-putkesta ulos virtaavan lämmönsiirtonesteen lämpötila ja T_i U-putken sisään virtaavan lämmönsiirtonesteen lämpötila. (Cengel & Ghajar, 2006)

Toisessa tapauksessa, kun U-putken pinnan lämpötila oletetaan vakioksi, jäähdytyksen Newtonin lain mukaan saadaan energiakaivon lämmitys- ja jäähdytysteho määritettyä yhtälön (2.25) mukaan seuraavasti: (Cengel & Ghajar, 2006)

$$\dot{Q} = h A_s \Delta T_{avg} = h A_s (T_p - T_m)_{avg}, \quad (2.25)$$

jossa \dot{Q} on lämpö- tai jäähdytysteho energiakaivosta, h on konvektiivinen lämmönsiirtokerroin, A_s U-putken pinnan pinta-ala, ΔT_{avg} lämpötilan asianmukainen erotus lämmönsiirtonesteen ja U-putken pinnan välillä, T_p U-putken pinnan lämpötila ja T_m U-putken sisällä virtaavan lämmönsiirtonesteen keskimääräinen lämpötila. T_{avg} voidaan tässä tapauksessa, kun U-putken pinnan lämpötila on vakio, määrittää likimääräisesti lämmönsiirtonesteen lämpötilaeron aritmeettisena keskiarvona. Aritmeettinen keskiarvo on esitetty yhtälössä (2.26): (Cengel & Ghajar, 2006)

$$\Delta T_{avg} \approx \Delta T_{am} = \frac{\Delta T_i + \Delta T_e}{2} = \frac{(T_p - T_i) + (T_p - T_e)}{2} = T_p - \frac{T_i + T_e}{2} = T_p - T_b, \quad (2.26)$$

jossa T_{am} on aritmeettinen keskilämpötila ja T_b nestetilavuuden keskilämpötila. Määritelmässä on kuitenkin oletuksia, jotka saattavat joskus antaa ei-hyväksyttäviä lopputuloksia, joten lämmönsiirtonesteen ja U-putken pinnan keskimääräisen lämpötilaeron määrittämiseen on suositeltavaa käyttää kehittyneempiä menetelmiä. (Cengel & Ghajar, 2006)

Parempaan lopputulokseen päästään, jos määritetään U-putkessa kulkevan lämmönsiirtonesteen ulostulolämpötila energiataseesta differentiaalisesti. Seuraavassa on esitetty, kuinka ulostulolämpötila T_o määritetään energiataseesta differentiaalisesti: (Cengel & Ghajar, 2006)

$$\dot{m}c_r dT_m = h(T_p - T_m) dA_s, \quad (2.27)$$

joka voidaan sieventää, kun tiedetään, että $A_s = p dx$, jossa p on U-putken kehä ja x on U-putken pituus. Näin saadaan seuraava yhtälö (2.28): (Cengel & Ghajar, 2006)

$$\frac{d(T_p - T_m)}{T_p - T_m} = -\frac{hp}{\dot{m}c_r} dx \quad (2.28)$$

Kun integroidaan yhtälö (2.28) nolasta L :ään eli pisteeseen, jossa $T_m = T_o$, saadaan yhtälö muotoon (Cengel & Ghajar, 2006)

$$\ln \frac{T_p - T_o}{T_p - T_i} = -\frac{hA_s}{\dot{m}c_r}, \quad (2.29)$$

josta ratkaisemalla T_o , saadaan todella hyödyllinen yhtälö (2.30), jonka avulla voidaan T_o määrittää alla olevalla tavalla:

$$T_o = T_p - (T_p - T_i) \exp\left(\frac{-hA_s}{\dot{m}c_r}\right) \quad (2.30)$$

Yhtälöstä (2.30) vastaavasti on apua määrittäessä suuretta ΔT_{avg} . (Cengel & Ghajar, 2006)

2.4.3 Analyttinen menetelmä U-putkienergiakaivon lämmönsiirron määrittämiseen

Analyttinen ja numeerinen menetelmä ovat yleisimmät tavat määrittää energiakaivon lämpövastus. Analyttiset menetelmien etu on, että ne ovat yksinkertaisia ja ne tuottavat nopeasti ratkaisuja. Analyttisten menetelmien heikkous vastaavasti on, että ne ottavat

huomioon vain lämmönjohtumisen eivätkä ota huomioon lainkaan konvektion vaikutusta. U-putkienergiakaivon lämpövastuksen määrittämiseen analyyttisesti on monia menetelmiä, kuten ääretön ja äärellinen viivalähdemalli sekä ääretön sylinterilähdemalli. Kaikissa malleissa oletetaan, että lämpövirta q' on vakio ja säteen suuntaista. Näin ollen kaivonsuuntaista lämpövirtaa ei oteta huomioon. Energiakaivon lämpövastus voidaan määrittää analyyttisesti myös siten, että se perustuu kokeelliseen testiin. Yksi tällainen menetelmä määrittää analyyttisesti energiakaivon lämpövastus pituusyksikköä kohden on esitelty alla olevassa yhtälössä (2.31): (Paul, 1996)

$$R_b = \frac{1}{\beta_0 \left(\frac{r_b}{r_p} \right)^{\beta_1} k_g}, \quad (2.31)$$

jossa r_b on energiakaivon säde, r_p lämmönsiirtoputken ulkosäde, k_g täyteaineen lämmönsiirtokerroin ja β_0 ja β_1 kokeellisesti määritettyjä muotokertoimia, jotka määräytyvät energiakaivossa lämmönsiirtoputkien sijainnin mukaan.

Jos halutaan analyyttisesti havainnollistaa energiakaivon toimintaan pidemmällä ajalla kuin 1,6 vuotta, kannattaa käyttää äärellistä viivalähdemallia. Äärellisen viivalähdemallin ratkaisu on muotoa (Philippea, et al., 2009)

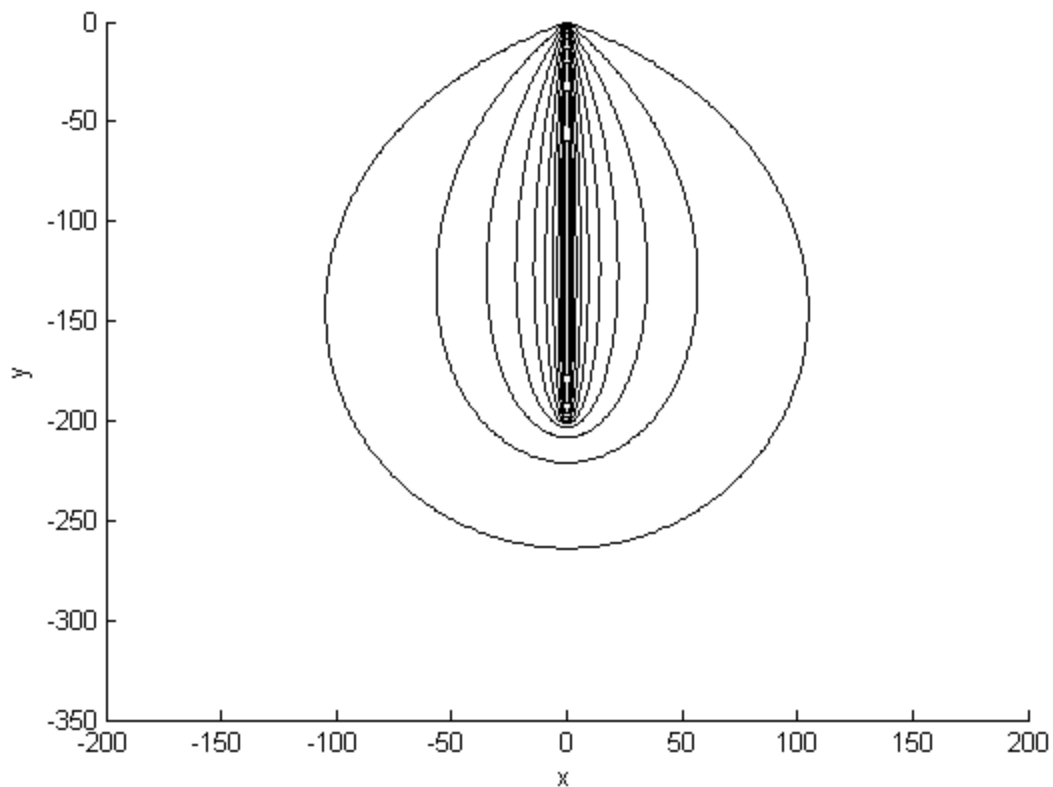
$$T_{y0} - T(r, t) = \frac{q_0}{4\pi k} \operatorname{erfc} \left(\frac{r}{2\sqrt{\alpha t}} \right), \quad (2.32)$$

jossa T_{y0} on häiritsemätön maan alkulämpötila, q_0 pistemäinen lämpölähteen teho, k maaperän lämmönjohtavuus, r energiakaivon säteensuuntainen koordinaatti, α terminen diffusiviteetti ja t aika. Tämän jälkeen, kun laitetaan pistemäisiä lämpölähteitä sarjaan ja integroidaan yhtälö ajasta $t=0$ äärettömään, voidaan yhtälö ratkaista numeerisesti. Integroitu yhtälö saa muodon (Philippea, et al., 2009)

$$T_{y0} - T(r, z) = \frac{q'}{4\pi k} \ln \left(\frac{\sqrt{r^2 + (z-H)^2} - (z-H) \cdot \sqrt{r^2 + z^2} + z}{\sqrt{r^2 + (z+H)^2} + (z+H) \cdot \sqrt{r^2 + z^2} - z} \right), \quad (2.33)$$

jossa q' lämpövirta kaivon syvyysmetriä kohden, z on tarkastelu syvyys ja H kaivon syvyys. Yhtälöllä voidaan ainoastaan mallintaa yhden energiakaivon lämmönsiirtoa pitkällä aikavälillä tarkasteltaessa, koska jos kaivoja on enemmän, vaikuttavat nämä toistensa lämmönsiirtoon. Yhtälöllä (2.33) voidaan ratkaista maaperän vakiintunut lämpötila pitkän aikavälin jälkeen. T_{y0} on usein numeerisessa ratkaisussa korvattu ilman vuotuisella keskilämpötilalla. (Philippea, et al., 2009)

Mallinnetaan yhtälön (2.33) avulla maaperän lämpökäyrät, kun maaperää rasitetaan 10 W/m lämpövirralla. Asetetaan lämpökaivon syvyydeksi 200 metriä ja maan häiritsemättömäksi lämpötilaksi 4 °C. Maaperän oletetaan olevan graniittia, jonka lämmönjohtavuus on 3,4 W/mK.



Kuva 16. Maaperän lämpökäyrät stationääritilanteessa energiakaivon rasituksesta johtuen. (Lahti, 2013)

Kuvan 16 lämpökäyrät ovat 0,2 °C välein, eli uloimman lämpökäyrän kohdalla maan lämpötila on 3,8 °C. Kuvasta nähdään hyvin, että jo 10 W/m lämpövirta aiheuttaa maaperässä jopa yli sadan metrin säteelle lämpötilan aleneman. Tämä on syytä ottaa huomioon, kun suunnitellaan laajempia energiakaivokenttiä, sillä kaivot vaikuttavat toistensa lämmönsiirtoon merkittävästi.

2.4.4 Numeerinen menetelmä U-putkienergiakaivon lämmönsiirron määrittämiseen

Analyttisten menetelmien lisäksi tarvitaan numeerisia menetelmiä energiakaivojen lämmönsiirron mallintamiseen, koska analyttisellä menetelmällä ei voida esimerkiksi mallintaa pohjaveden liikkeen aiheuttamaa konvektiolämmönsiirtoa. Numeeriset menetelmät ovat yleisiä, mutta ne ovat laskennallisesti tehottomia. Keskeistä numeeristen menetelmien tehottomuudessa on, että energiakaivon lämmönvaihtimien äärimmäinen hoikkuus ja ympäröivän maaperän geometria tekevät numeerisesta analyysistä laskennallisesti erityisen vaativan.

Esimerkkinä numeerisesta menetelmästä Shargawy (Shargawy, et al., 2009) esittää lämpövastustutkimuksessaan 2D äärellisen elementin mallin, joka perustuu mitattuun dataan. 2D äärellisen elementin mallissa energiakaivon lämpövastus määritellään seuraavasti

$$R_b = \frac{1}{2\pi k_g} \left[\frac{-1.49}{\lambda_2} + 0.656 \ln(\lambda_1) + 0.436 \right], \quad (2.34)$$

jossa k_g on täyteaineen lämmönjohtavuus, λ_1 ja λ_2 ovat dimensiottomia geometrisia parametreja. Parametri λ_1 vaihtelee 0,2 ja 0,8 välillä. Vastaavasti parametri λ_2 vaihtelee 2,5 ja 7 välillä. Samassa tutkimuksessa, jossa yhtälö (2.34) määritettiin, verrattiin numeerisen menetelmän antamaa tulosta analyttisellä menetelmällä saatuun tulokseen. Tulokseksi saatiin, että menetelmien ero oli vain jotain prosentin osia. Näin voidaankin todeta, että menetelmien eroavuus ainakin kyseisessä tutkimuksessa oli merkityksetön. (Shargawy, et al., 2009)

Bennet (Bennet, 1987) kehitti kokeellisesti yhtälön (2.35), jonka ensimmäinen termi on viivalähdetekijä ja toinen termi on ensimmäisen kertaluvun moninapainen korjaus. Tämä lauseke (2.35) on käytössä muun muassa EED-suunnitteluohjelmistossa. Myös Shargawy perustaa oman yhtälönsä taustansa yhtälöön (2.35).

$$R_b = \frac{1}{4\pi k_g} \left[\ln \left(\frac{\lambda_1 \lambda_2^{1+4\sigma}}{2(\lambda_2^4 - 1)^\sigma} \right) - \frac{\lambda_3^2 \left(1 - \left(4\sigma / (\lambda_2^4 - 1) \right) \right)^2}{1 + \lambda_3^2 \left(1 + \left(16\sigma / (\lambda_2^2 - 1/\lambda_2^2)^2 \right) \right)} \right], \quad (2.35)$$

jossa σ , λ_1 , λ_2 ja λ_3 ovat dimensiottomia muuttujia, jotka määritellään seuraavissa yhtälöissä.

$$\sigma = \frac{k_g - k_s}{k_g + k_s}, \quad (2.36)$$

jossa k_g on täyteaineen ja k_s on maaperän lämmönsiirtokerroin.

$$\lambda_1 = \frac{r_b}{r_p}, \quad \lambda_2 = \frac{r_b}{x_c}, \quad \lambda_3 = \frac{r_p}{2x_c} = \frac{\lambda_2}{2\lambda_1}, \quad (2.37), (2.38), (2.39)$$

jossa r_b on energiakaivon säde, r_p lämmönsiirtoputken ulkosäde ja x_c on puolet sisään- ja ulosmenoputkien keskikohtien välisestä etäisyydestä.

2.4.5 Differenssimenetelmään perustuva numeerinen ratkaisu

Dynaamisen simulointiohjelmiston IDA Indoor Climate and Energy (IDA-ICE) 4.6.1 laajennusosa IDA-ICE Boreholes 1.0 käyttää energiakaivoja mallintaessaan ja mitoittaessaan numeerista ratkaisua, joka perustuu differenssimenetelmään. Menetelmässä oletetaan, ettei lämpötila maanpinnalla muutu. Eskilson on myös ehdottanut g-funktioita kuvaamaan energiakaivon suorituskykyä ja kehittänyt g-funktiokäyriä, jotka perustuvat valikoituihin energiakaivojen rakenteisiin. Eskilsonin malli on IDA-ICE:n lisäksi liitetty myös osaksi EED-simulointiohjelmää. (Bandyopadhyay, et al., 2008) (Eskilson, 1987) (Lee & Lam, 2008)

IDA-ICE Boreholes 1.0 laajennuksessa lämpötilakenttien lukumäärä lasketaan käyttämällä differenssimenetelmää. Jokaiselle energiakaivolle määritetään yksiulotteinen lämpötase, jossa huomioidaan U-putkessa sisään ja ulospäin kulkevan lämmönsiirtoneste, täyteaineen ja maaperän välinen lämmönsiirtyminen. Lisäksi energiakaivojen täyteaineelle määritetään yksiulotteinen lämpötase siten, että otetaan huomioon lämmönsiirto lämmönsiirtoneste ja maaperän välillä. Kolmas määriteltävä lämpötase on kak-

siulotteinen ja sylinterikoordinaatistollinen. Tämä lämpötase kohdistuu energiakaivon ympäristöön siten, että otetaan huomioon lämmönsiirto energiakaivon täyteaineen ja lämmönsiirtonesteen välillä. (EQUA Simulation AB, 2012)

Rajallisesta differentiaalimenetelmästä on myös kolmiulotteinen malli, joka perustuu nelikulmaisen koordinaatistosysteemiin, jossa diskretoidaan maaperä energiakaivokentän ympärillä ja esitetään neliön suuruisina sarakkeina. Lämmönsiirron sallimisella energiakaivossa pystysuuntaan voidaan arvioida energiakaivon todellinen lämpötila ja latausprofiili, ja tutkia latausprofiilin vaikutus energiakaivon suorituskykyyn.

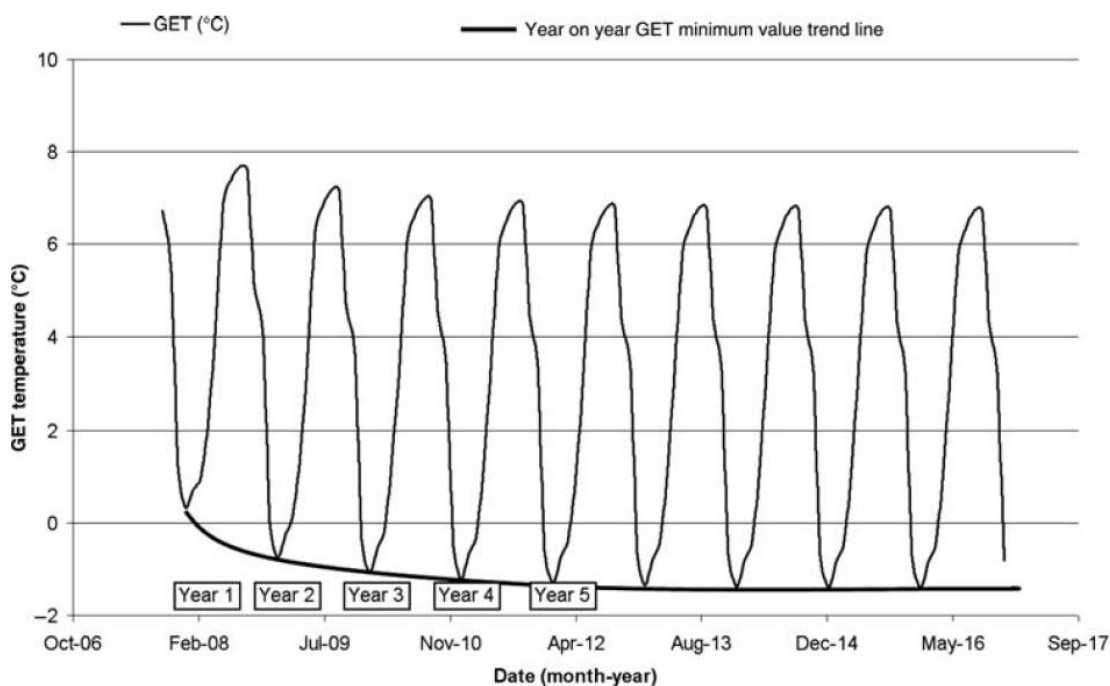
Kolmiulotteisen mallin etuja ovat, että sillä voidaan esittää lämmönsiirtonesteen dynaamisuus ja kulkeminen U-putkessa. Lisäksi voidaan mallintaa energiakaivon, lämmönsiirtonesteen ja maaperän lämpötilavaihtelut kaivon syvyyssuunnassa. Myös kallion ja maaperän erilaiset kerrokset voidaan selvästi esittää ja soveltaa ilmaston rajaehdoja maanpintaan. Kolmiulotteinen malli mahdollistaa myös energiakaivon alapuolisen lämmönsiirron huomioonottamisen tarkemmin, ja maan vertikaalisen lämpötilagradientin soveltamisen. Myös äärellisessä viivalähde mallissa käytetään samanlaisia menetelmiä, mutta mallissa käytetään puolestaan pistelähdetarkaisista kehitettyä analyttistä lauseketta laskemaan maan lämpötilan muutokset. (Zeng, et al., 2003) (He, et al., 2009)

2.4.6 Energiakaivokentän vaikutukset yhden energiakaivon lämmönsiirtoon

Yksittäisen energiakaivon lämmönsiirtymisen teoria monimutkaistuu, kun asennetaan energiakaivoja samaan järjestelmään energiakaivokentäksi. Energiakaivoja ei kuitenkaan ole suositeltavaa asentaa 15 metriä lähemmäksi toisiaan. Energiakaivot saattavat olla kaivon alaosa hieman vinossa maan pinnan normaaliin nähden kaivon syvyyden aiheuttaman epätarkkuuden takia. Energiakaivojen vinous saattaa vaikuttaa energiakaivojen lämmönsiirtokykyyn jonkin verran. Energiakaivojen liian suuri rasitus on kuitenkin tärkein asia, joka tulee välttää mitoittaessa energiakaivokenttää. Jos energiakaivoista siirretään liian paljon lämpöenergiaa maalämpöjärjestelmällä, on vaarana energiakaivokentän jäätyminen. Tällöin jäätyvät myös pohjavedestä täyttyneet energiakaivot, jolloin on uhkana lämmönsiirtoputkiston rikkoutuminen. Pahimmassa tapauksessa jäätymisestä voi siis seurata ympäristöriski, jos lämmönsiirtonestettä pääsee valumaan maaperään. (Acuña, 2010) (Wood, et al., 2010) (Juvonen & Lapinlampi, 2013)

Energiakaivokentän rasitus mitoitetaan sopivaksi siten, että maasta siirretään lämpöä lämmönkeruuputkiston kautta vain sen verran, ettei energiakaivokentän maan keskilämpötila pitkänäkään aikana jäähdy, vaan tasaantuu sopivalle tasolle. Kuvassa 17 on simuloitu glykolin lämpötila lämmönsiirtonesteenä eräässä energiakaivokentässä kymmenen vuoden ajan. Kuvasta nähdään, että glykolin minimilämpötila tasaantuu viidentenä vuonna $-1,43\text{ }^{\circ}\text{C}$ tasolle. Minimilämpötilan on ennustettu laskevan minimissään $-1,46\text{ }^{\circ}\text{C}$ tasolle 25 vuoden päähän tarkasteltaessa. (Wood, et al., 2010)

Jäätymisen aikana vesi luovuttaa latenttilämmön, joka syntyy jäätymisessä. Jäätyminen ei ole kuitenkaan hyväksi järjestelmän toimimisen ja kestämissen kannalta, jäättyessään vesi laajenee, mikä voi aiheuttaa tuhoa energiakaivossa. Lisäksi energiakaivon sulaminen saattaa kestää hyvin kauan, koska sulaakseen jää tarvitsee latenttilämmön. Tästä syystä lämpötilan nouseminen energiakaivossa saattaa kestää hyvin kauan jäätymisen jälkeen. (Acuña, 2010) (Cabeza, 2012)



Kuva 17. Lämmönsiirtonesteen (glykoli) simuloitu lämpötila eräässä energiakaivokentän lämmönsiirtopiirissä kymmenen vuoden aikana. (Wood, et al., 2010)

3 Maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmän tuomat vaatimukset asuinkerrostalon suunnitteluun ja rakentamiseen

Maalämmitys- ja -jäähdytysjärjestelmän asentaminen asuinkerrostaloon asettaa haasteita jo asuinkerrostalon suunnitteluvaiheeseen. Suunnittelussa täytyy ottaa huomioon, että energiakaivoja tarvitaan usein paljon suurempi lukumäärä kuin pientalon maalämpöjärjestelmässä rakennuksen pinta-alan laajenemisesta aiheutuvan suuremman energiankulutuksen vuoksi. Tarvittavien energiakaivojen lukumäärään kuitenkin vaikuttaa myös, kuinka suuren osan rakennuksien vaatimasta maksimilämmitystehosta maalämpöpumppu mitoitetaan kattamaan. Lisäksi maalämmitys- ja -jäähdytysjärjestelmä vaatii energiatehokkuutensa säilyttämiseksi myös matalalämpöisen energian varastointi- ja -jakelujärjestelmän.

Maaperästä saatava lämpöenergia on uusiutuvaa energiaa, joka täyttää energiadirektiivin vaatimuksen rakennuksen käyttämän energian tuottamisesta uusiutuvista energianlähteistä. Myös sähköllä tuotettu energia voi olla uusiutuvaa energiaa, jos energia on tuotettu esimerkiksi rakennukseen asennetuilla aurinkopaneeleilla. Tässä tutkimuksessa suositellaan tutkimaan aurinkoenergian mahdollisuutta osana maalämpöjärjestelmää, jotta lämpimän käyttöveden lämmittäminen kesäaikana olisi tehokkaampaa.

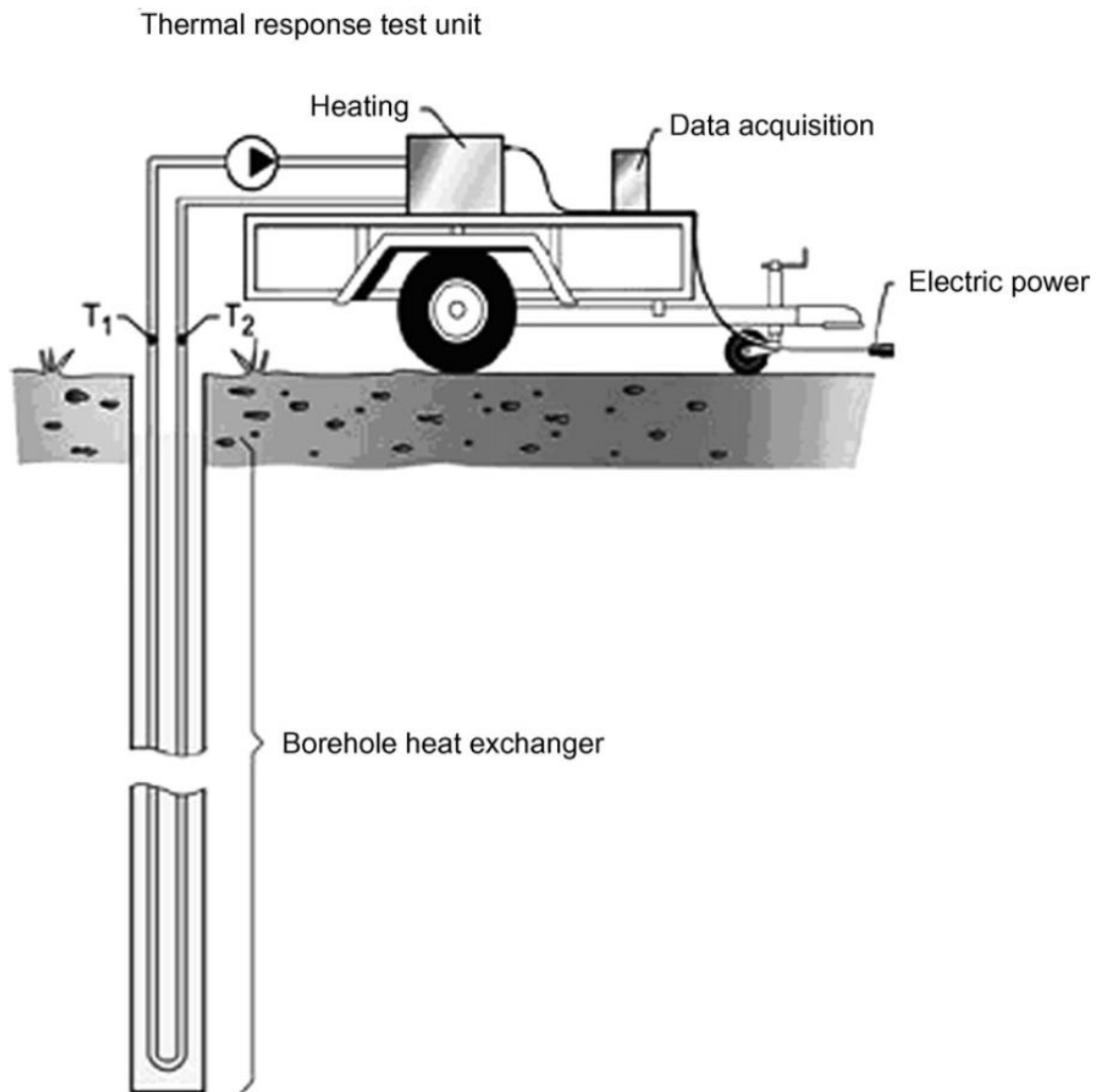
3.1 TRT-mittaus

Maalämmitys- ja -jäähdytysjärjestelmän toiminnan kannalta lämmönkeruuputkiston suunnittelu on erittäin tärkeää, jotta maaperän energia pystytään hyödyntämään optimaalisesti. Rakentamisen asiantuntijoilla on jo tarpeeksi kokemusta pientalojen lämmönkeruuputkistojen rakentamisesta, joten pientalojen lämmönkeruuputkiston termistä toimivuutta ei tarvitse tutkia joka rakennuskohteessa. Kuitenkin jos suunnitellaan suurempaa kuin kymmenen energiakaivon energiakaivokenttää merkittävälle lämpöenergian tarpeelle, on TRT (Thermal Resistance Test) -mittaus välttämätön tehdä kohteen maaperään. TRT-mittauksesta saatujen maaperän termisten ominaisuuksien mukaan pystytään kohteeseen suunnittelemaan vaatimukset täyttävä optimaalinen energiakaivokenttä.

TRT-mittaus on saavuttanut Ruotsissa jo kiitettävän suosion mutta Suomessa TRT-mittaus ei kuitenkaan ole vielä saanut vastaavaa suosiota. Suomessa TRT-mittaus tulisi

saada suositummaksi, jotta jokaisessa rakennuskohteessa, johon maalämpöjärjestelmä asennetaan, voitaisiin varmistua maaperän käyttäytymisestä ja sitä kautta maalämpöjärjestelmän toimimisesta. Jos maalämpöjärjestelmä suunnitellaan ilman TRT-mittauksen tuloksia, on vaarana, että maalämpöjärjestelmä mitoitetaan ja asennetaan väärin. Seurauksena voi olla esimerkiksi koko järjestelmän jäätyminen, mikä voi olla katastrofaalista rakennuksen lämmityksen kannalta.

TRT-mittaus tehdään aina maaperään, johon lämpökaivokenttä on suunnitteilla rakentaa. TRT-mittauslaitteisto koostuu karrystä, jonka päällä on lämmönsiirtonestettä sisältävä tankki. Lämmönsiirtonestettä lämmitetään sähkövastuksella, jonka jälkeen pumpataan lämmitettyä lämmönsiirtonestettä maaperään porattuun U-putkeen. U-putki sisältää lämpötila-anturit sekä meno- että tulopuolella. Näin pystytään mittamaan, kuinka paljon neste jäähtyy lämmönsiirtoputkistossa maassa. Kun tiedetään lämpötilaero lämmönsiirtonesteessä ja lämmönkeruuputkiston dimensiot, laitteistoon kytketty tietokone laskee maaperän termiset tiedot. TRT-mittauslaitteisto toimii periaatteeltaan samalla lailla kuin miten maalämpöjärjestelmään asennettu jäähdytysjärjestelmä toimii eli se siirtää lämpöä maaperään. TRT-mittauksessa ei siis mitata maaperän kykyä luovuttaa lämpöenergiaa vaan kykyä vastaanottaa lämpöenergiaa. Termisten ominaisuuksien selvittämiseksi lämpövirran suunnalla testissä ei ole merkitystä. (Gehlin, 2002) (Gustafsson, 2010) (GTK, 2011) (Gehlin & Hellström, 2003)



Kuva 18. TRT-mittauslaitteisto. (Signorelli, et al., 2006)

3.2 Energiakaivokentän mallintaminen ja mitoitus

Energiakaivokentän ammattitaitoinen mallintaminen TRT-mittauksen pohjalta on edellytys monta vuotta moitteettomasti toimivalle energiakaivokentälle. Mallintamisella pyritään varmistamaan esimerkiksi, ettei energiakaivojen ympäröimä maaperä ja lämmönsiirtonesteinä käytettävä bioetanoliliuos jäädy lämmönkeruupiirissä talvella, kun lämmönsiirto maasta on suurimmillaan. Maalämpöjärjestelmään asennettu jäähdytys edistää maaperän ja lämmönkeruunesteen jäätymättömyyttä. Kesällä jäähdytystä käytettäessä siirretään rakennuksesta lämmönsiirtoputkistoa pitkin maaperään lämpöenergiaa, mikä nostaa maaperän keskilämpötilaa. Näin jäähdytyksen liittämällä maalämpöjärjestelmään edistetään, etteivät maaperä ja lämmönsiirtoneste jäädy talvella. Samalla varmistetaan myös, ettei lämmönsiirtonesteen usean viikon keskilämpötila pääse putoa-

maan pitkäksi aikaa alle 0 °C. Lämmönsiirtonesteen lämpötilan absoluuttinen alaraja on -5 °C, jonka alle lämmönsiirtonesteen lämpötila ei saa pudota lainkaan. Mitoitettaessa ja mallinnettaessa on siis todella tärkeää hyödyntää TRT-mittauksen tuloksia, jotta järjestelmän toimivuus voidaan optimoida. (EED 3.0, 2008)

Mitoituksessa lämmönsiirtonesteen lämpötila on yksi seurattavista suureista, kun mallinnetaan ja mitoitetaan energiakaivokenttää. Lämmönsiirtonesteen lämpötilaan vaikuttavat rakennuksien lämmitys- ja jäähdytystarpeet sekä energiakaivokentän kuormituksen suuruus. Mallinnettaessa maaperän lämpötilan käyttäytyminen on syytä tutkia vähintään kymmenen vuoden ajan, jotta voidaan varmistua järjestelmän toimivuudesta koko sen elinkaaren ajan.

Suomessa lämmitystarve on lähes aina suurempi kuin jäähdytystarve johtuen keskivertoa kylmemmästä ilmastosta. Näin ollen lämmönsiirtonesteen lämpötila alkaa hiljattain laskea, koska maasta siirretään yhden vuoden aikana lämpöenergiaa enemmän rakennukseen kuin rakennuksesta takaisin maahan. Lämmitys- ja jäähdytysenergian tarpeen suhdetta kuvaamaan on kehitetty kuormituskerroin. Kuormituskerroin on arvoltaan nolla, jos lämmitys- ja jäähdytysenergian tarpeet ovat yhtä suuret eli ollaan tasapainotilanteessa. Tutkimuksen kohteena olevien Espooseen rakennettavien asuinkerrostalojen jäähdytysenergian tarve on pienempi verrattuna lämmitysenergian tarpeeseen, joten kuormituskerroin saa arvon nollan ja yhden väliltä. Kuormituskerroin on tarpeellinen valittaessa energiakaivokentän muotoa ja kokoa. Kuormituskertoimen ε laskukaava on

$$\varepsilon = \frac{Q_{heat} + Q_{cool}}{|Q_{heat}| + |Q_{cool}|}, \quad (3.1)$$

jossa Q_{heat} on lämmitysenergian tarve ja Q_{cool} on jäähdytysenergian tarve. (Nylund, 2010)

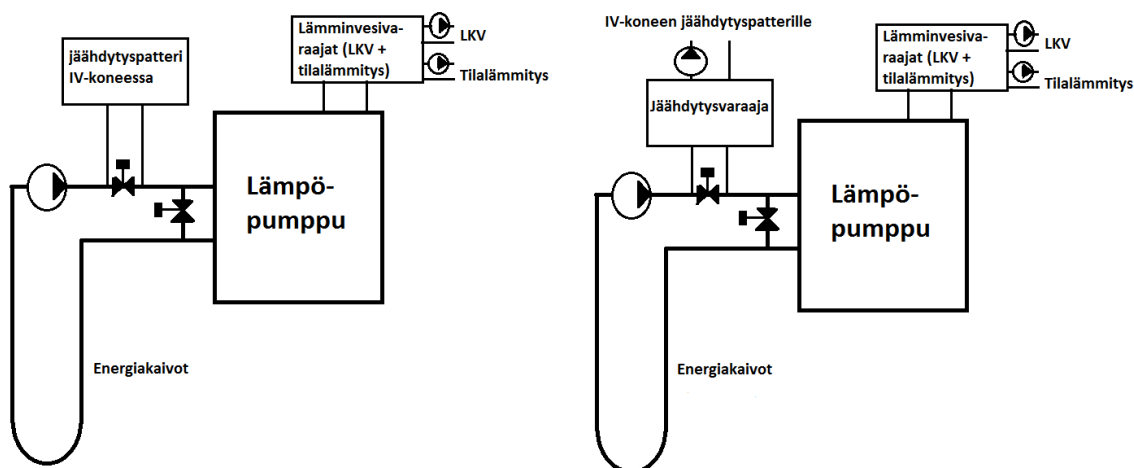
Mallinnettaessa ei saa energiakaivoja sijoittaa liian lähelle toisiaan, jotta energiakaivojen ympäröimä maaperä kestäisi kaivojen maahan kohdistaman rasituksen. Energiakaivoja ei myöskään kannata mitoittaa liian etäälle toisistaan, koska usein rakennustontin laajuus saattaa rajoittaa niiden asennusta mitoitettussa laajuudessaan. Maalämmitysjärjestelmien lisääntyä järjestelmien rakentamista ja suunnittelua onkin alettu tarkemmin valvoa. Vuonna 2011 maalämpöjärjestelmän rakentamisesta tuli luvanvaraista. Siitä

lähtien maalämpöjärjestelmän rakentaminen uudisrakennukseen ja saneeraus vanhaan rakennukseen vaativat aina rakennusvalvonnan luvan. Samalla myös määriteltiin joitain suosituksia energiakaivojen minimietäisyyksille esimerkiksi naapurin rajasta ja toisista energiakaivoista. (Juvonen & Lapinlampi, 2013)

3.3 Maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmän laitevaatimukset

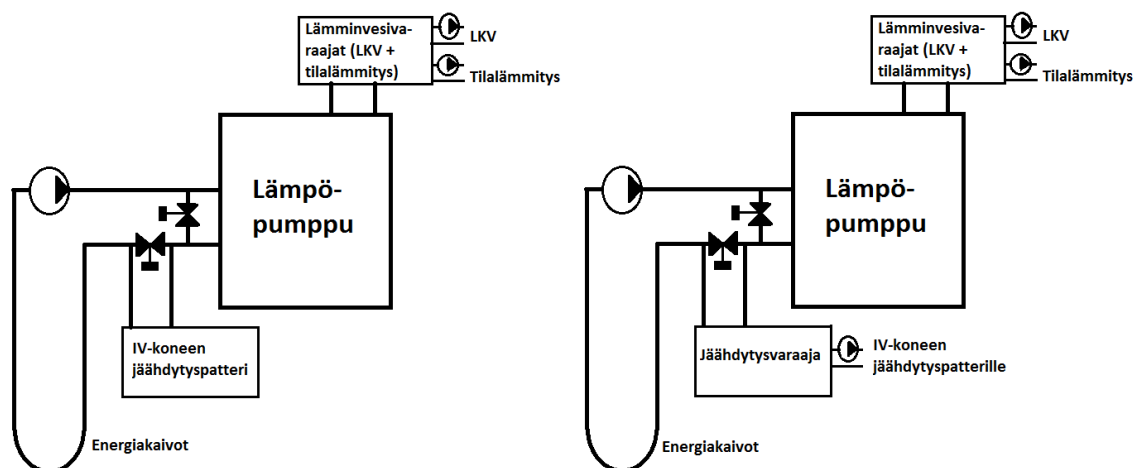
Maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmä vaatii osakseen matalalämpöjärjestelmään sopivat energiavaraajat sekä lämmön- ja kylmänluovutuslaitteet. Jos yhdistetään sekä maalämpö- että -jäähdytysjärjestelmä, voidaan järjestelmä asentaa usealla eri tavalla. Jäähdytys voidaan saada aikaan joko lämpöpumpun avulla tai vapaajäähdytyksenä. Simuloinnissa oletetaan, että jäähdytyksessä käytetään lämpöpumppua, vaikka jäähdytys toteutetaan kin vapaajäähdytyksenä. Tämän sen vuoksi, jotta simulointi ottaisi huomioon kesäaikaan jäähdytyksen aiheuttamat lämpötilan muutokset. Simulointiohjelmistossa ei ole vaihtoehtoa vapaajäähdytykselle.

Seuraavassa on muutamia vaihtoehtoja jäähdytyksen asennukselle vapaajäähdytyksenä. Kahdessa ensimmäisessä esimerkkikytkentävaihtoehdossa vapaajäähdytyspiiri liitetään suoraan lämmönkeruupiiriin ennen lämpöpumppua, mutta jäähdytyksen lämmönsiirrin on erilainen. Ensimmäisessä esimerkissä kuvan 19 vasemmanpuoleisessa kytkennässä jäähdytyksen lämmönsiirrin on suoraan IV-koneen jäähdytyspatteri ja toisessa esimerkissä kuvan 19 oikeapuoleisessa kuvassa jäähdytysvaraajan kierukka. Vapaajäähdytyspiirin jälkeen molemmissa esimerkeissä jäähdytyksen lämmönsiirtimessä lämmennyt lämmönkeruuneste johdetaan lämpöpumppuun, josta lämpöenergian luovutettuaan neste jatkaa matkaansa takaisin lämmönkeruupiiriin. Jäähdytyksen tuottaminen lämmönkeruupiiristä ei vaikuta maalämpöpumpun toimintaan.



Kuva 19. Vapaajäähdytyspiirin kytkentä maapiiriin ennen lämpöpumppua. Vasemmalla puolella on ilman jäähdytysvaraajaa ja oikealla jäähdytysvaraajan kanssa.

Kolmannessa ja neljännessä esimerkkikytkentävaihtoehdossa jäähdytyspiiri kytketään lämmönkeruupiiriin lämpöpumpun jälkeen. Kolmannessa esimerkkikytkennässä kuvan 20 vasemmanpuoleisessa kytkentämallissa jäähdytyspiiri kytketään suoraan IV-koneen jäähdytyspatteriin ilman jäähdytysvaraajaa. Vastaavasti neljännessä esimerkkikytkennässä kuvan 20 oikean puoleisessa kytkentämallissa jäähdytyspiiri kytketään jäähdytysvaraajaan kierukka lämmönsiirtimellä. Molemmissa esimerkeissä jäähdytyspiirissä lämmennyt lämmönkeruuneste johdetaan lämmönkeruupiiriin maahan, jossa lämmennyt lämmönkeruuneste luovuttaa ylimääräisen lämpöenergiansa maaperään. Tämän kytkentämallin tarkoitus on hidastaa maaperän hiljattaista kylmenemistä.



Kuva 20. Vapaajäähdytyspiirin kytkentä maapiiriin lämpöpumpun jälkeen. Vasemmalla puolella on ilman jäähdytysvaraajaa ja oikealla jäähdytysvaraajan kanssa.

Myös maalämmitysjärjestelmällä on erityisvaatimuksia. Lämmityksen jakojärjestelmän pitää olla vesikiertoinen matalalämpötilallinen kuten lattialämmitys tai matalilla lämpötiloilla toimiva radiaattoriverkosto. Maalämpöpumpun pitää sisältää tulistussyksikkö, jolla pystytään tuottamaan lämmintä käyttövettä. Varastoinnissa on suositeltavaa käyttää kaksiosaista tulistusenergiavaraajaa, jonka ylempään osaan varastoidaan lämpöpumpun tulistimella tuotettu kuumin energia lämmintä käyttövettä varten. Alempaan osaan varastoidaan rakennuksen lämmityksen käyttöön matalalämpöisempää energiaa. Tulistusenergiavaraaja on jaettu keskeltä reiällisellä metallilevyllä, joka päästää vettä läpi, mutta kuumin energia varastoituu varaajan yläosaan. Matalalämpöisempää energiaa voidaan tuottaa energiavaraajaan myös esimerkiksi aurinkolämmityspiirillä, mutta tässä tutkimuksessa sitä ei huomioida. Toinen vaihtoehto on asentaa järjestelmään erikseen tilojen lämmittämiseen tarkoitettu varaaja ja lämpimän käyttöveden varaaja. Näin voidaan tarvittaessa kesällä hyödyntää tilojen lämmittämiseen tarkoitettu varaaja kesällä jäähdytyksen varaajana. (Lämpöässä, 2014)

3.4 Lisä- ja varalämmitys

Riippuen maalämpöpumpun mitoituksesta saattaa maalämmitysjärjestelmä vaatia lisälämmitystä, jotta lämmitysenergian tarve pystytään takaamaan huippukulutuksen aikaan. Yleisin lisälämmitysmuoto on sähkölämmitys, joka voidaan helposti automatisoida kytkymään päälle silloin, kun energiavaraajan lämpötila laskee määritetyn lämpötilan alarajan alle. Teknisesti sähkölämmitys kytketään energiavaraajaan sähkölämmityskierukalla, joka siirtää energiavaraajaan lämpöenergiaa. Sähkölämmityskierukka voi toimia myös lämmitysjärjestelmän varalämmittimenä tilanteissa, joissa maalämpöpumppu ei jostain syystä toimi.

Tässä tutkimuksessa on tavoitteena tutkia myös pintapuolisesti energiatehokkainta ja ympäristöystävällisintä lisä- ja varalämmitysmuotoa. Lisä- ja varalämmitysmuodoksi on varmasti helpoin asentaa sähkölämmitys, mutta sähköenergia usein tuotetaan fossiileista polttoaineista tai ydinvoimalla. Fossiilit energianlähteet ja ydinvoima eivät kuitenkaan ole ympäristöystävällisimpiä, ja sitä myöten myöskään energiadirektiivin vaatimuksia täyttäviä uusiutuvia energianlähteitä. Yksi mahdollinen lisä- ja varalämmitysmuoto saattaisi olla kuitenkin sähkölämmitys, jonka sähköenergia tuotetaan omavaraisesti joko tuulivoimalla tai aurinkovoimalla. Näiden ratkaisujen ongelma ainakin vielä on niiden taloudellinen kannattamattomuus ja sähköenergian vaikea varastointi. Toisaalta näiden

järjestelmien tekniikka kehittyä kokoajan, ja näin myös investointikustannukset laskevat. Lisäksi investointikustannuksia laskee tuuli- ja aurinkovoiman yleistyminen kuluttajien valintana. Voi siis olla, että nämä uusiutuvia energianlähteitä hyödyntävät energiatuotantomuodot yleistyvät nopeammin kuin tällä hetkellä uskotaan.

Tuulivoiman kannattavuuteen vaikuttavat suuresti ilmasto-olosuhteet, eli milloin tuulee ja kuinka paljon. Näin ollen tuulesta tuotettua sähköenergiaa tulisi pystyä varastoimaan sen kannattavuuden takaamiseksi. Aurinkovoiman taloudellisuudettomuuden syy on se, että aurinkosähkön hyötysuhteet eivät ole vielä tarpeeksi korkeat Suomen leveyspiirillä, ja aurinko paistaa juuri silloin, kun auringosta saatua energiaa ei tarvita. Eli myös aurinkosähkön kannattavuuden takaamiseksi sähköenergiaa pitäisi pystyä varastoimaan paremmin, jotta esimerkiksi kesällä tuotettua aurinkosähköä pystyttäisiin hyödyntämään talvella, jolloin rakennusta joudutaan lämmittämään.

Toisaalta kesällä aurinkoenergian hyödyntäminen lämpimän käyttöveden lämmittämisessä on syytä tutkia ainakin maalämpöpumpun yhteydessä. Aurinkoenergian hyödyntäminen lämpöenergiana on kannattavampaa kuin energian tuottaminen sähköksi, mutta sähköä voisi hyödyntää lämpimän käyttöveden varaajien lisälämmittimien sähkölähteenä. Aurinkolämmössäkin on omat ongelmansa, sillä lämpöenergiaakaan ei voida kesältä varastoida talveksi lämmityksen käyttöön. Aurinkolämmityksessä on ongelmia jopa kesäpäivänä, koska lämpöenergia auringosta saadaan hyödynnettyä parhaalla hyötysuhteella keskipäivällä, jolloin lämmönkulutus eli käytännössä lämpimän käyttöveden kulutus kotitalouksissa on mitätöntä. Suurilla energiavaraajilla pystytään kesäaikana kuitenkin melko hyvin hyödyntämään keskipäivän aurinkoenergia. Tällöin lämmin käyttövesi pysyy lämpimänä myös aamulla ja illalla, jolloin lämpimän käyttöveden kulutus on suurimmillaan.

Tulevaisuudessa olisikin tärkeä pystyä kehittämään lisä- ja varalämmitysmuodoksi sähkölämmityksen tilalle uusia uusiutuviin lämmönlähteisiin perustuvia järjestelmiä. Etenkin Suomessa puun hyödyntämistä lämmitysenergianlähteenä pitäisi kehittää puiden runsaan määrän takia. Suomen maapinta-alasta metsää on suuri osa, joten puuta pitäisi riittää, vaikka puiden käyttö lämmitysenergianlähteenä lisääntyisikin. Lisäksi puut ovat uusiutuva energialähde, mikä lisää puun käyttömahdollisuuksia määräyksien tiukentumisesta huolimatta. Tällä hetkellä Suomessa puuta käytetään lämmönlähteenä takassa ja

pellettilämmityksessä. Negatiivisia seurauksia puun polttamisesta ovat syntyvät myrkylliset kaasut ja yltiöpäisestä puiden hakkuusta aiheutuva puukannan vähentyminen.

Kaukolämmön mahdollisuus lisälämpönä tulee myös tutkia, sillä se voisi tulevaisuudessa olla varteenotettava vaihtoehto, jos lämmöntuotantolaitoksien kanssa päästäisiin sopuun kohtuullisista lisälämmityksen liittymismaksuista. Etenkin, jos kaukolämpöä tuotettaisiin uusiutuvista energianlähteistä, olisi se oiva vaihtoehto lisälämmitysjärjestelmäksi. Lisäksi kaukolämpö olisi helppo liittää esimerkiksi maalämpöjärjestelmään, koska molemmat järjestelmät toimivat vesikiertoisilla lämmönjakojärjestelmillä. Vastaavasti ilma-vesilämpöpumpulla voitaisiin tuottaa tarvittava lisälämpö. Ilma-vesilämpöpumppu olisi myös mahdollista liittää maalämpöjärjestelmään, mutta tämänkin järjestelmäasennuksen ongelmana ovat vielä liian suuret investointikustannukset, silloin kun ilma-vesilämpöpumppua käytetään ainoastaan lisälämpöenergian tuottoon.

3.5 Lämpimän käyttöveden valmistaminen maalämpöpumpulla kesäaika- **na**

Talvella lämpimän käyttöveden lämmitysongelmia ei ole, koska tilojen lämmitys on vallitseva lämmöntarve. Tällöin kompressorikäyttö on riittävän usein ja yhtäjaksoisesti joka tapauksessa. Kuitenkin lämpimän käyttöveden valmistaminen maalämpöpumpulla kesäaikana saattaa muodostua ongelmalliseksi, sillä tilojen lämmityskuormaa ei kesällä ole lainkaan, ja lämpöpumpun kompressoreja ei ole suositeltavaa käynnistää liian usein ja liian lyhyeksi aikaa. Kompressorin on maalämpöpumpun kovimman rasituksen vastaanottava osa, ja lyhytaikainen käynnistäminen liian usein kuluttaa kompressoria entistään. Yleisesti kompressorin käyttöikä on keskimäärin 10 – 15 vuotta, mutta liian usein tapahtuvasta käynnistyksestä ja lyhyestä käyntiajasta johtuen, lämpöpumpun kompressorin saattaa rikkoutua jo ennen kompressorin ennustetun elinkaaren loppua. (Suomen Lämpöpumpputekniikka Oy, 2012) (Vatajankosken Sähkö Oy, ei pvm)

3.5.1 Lämpimän käyttöveden lämmittämisessä esiintyneet ongelmat kesäaika-

Ajankohtaiseksi tutkimusaiheeksi lämpimän käyttöveden lämmitys maalämpöpumpulla kesäaikana tuli asiakkaan pyynnöstä. Asiakkaan kohteissa, joihin on lämmöntuotantojärjestelmän saneerauksessa asennettu maalämpöjärjestelmä, on esiintynyt kesäaikaan ongelmia lämpimän käyttöveden riittävydessä. Lämpimän käyttöveden riittämättö-

myys on johtunut suurimalta osin ilmeisesti siitä, että kompressoreja on haluttu säästää. Tällöin kompressoreiden käyntiaikoja on pidennetty ja käynnistyskertoja harvennettu. Näin ollen energiavesivaraajan tilavuus pitäisi olla suurempi, jotta lämmintä käyttövettä voisi lämmittää suuremman vesitilavuuden yhdellä kompressorin käynnistyskerralla. Lämminvesivaraajien vesitilavuuden kasvattamisen estää etenkin saneeraushankkeissa lämmönjakohuoneen rajallinen pinta-ala. Uudisrakennuksissa tilaongelma voi olla helppo ratkaista, sillä rakennukseen voi olla mahdollista suunnitella suurempi lämmönjakohuone. Suurempi lämmönjakohuone ei välttämättä ole taloyhtiön kannalta kuitenkaan kannattavin, koska se luokitellaan tekniseksi tilaksi, joka ei kuulu myytäviin tai vuokrattaviin neliöihin.

Lämpimän käyttöveden kesäajan lämmitysongelmaan kannattaa lähteä ensimmäisenä etsimään ratkaisua kompressorien pidemmästä kestävyydestä. Kompressorien rakenteellinen ja tekninen toimivuus liittyy lähemmin rakenne- ja konetekniikkaan kuin LVI-tekniikkaan, joten myös kompressorien keston asiantunteva tutkimus on syytä tehdä rakenne- ja konetekniikan opein. Toisaalta kompressoreiden toimivuuteen ja kestoon vaikuttaa myös kompressorien käyntikerrat sekä käyntioloaikojen kesto. Tältä osin ongelmaan onkin mahdollisuus vaikuttaa maalämpöjärjestelmän säädöillä ja mitoituksella. Yksi mahdollinen ratkaisu lämpimän käyttöveden tuotanto-ongelmaan kesäaikaan saataisi olla aurinkovoiman hyödyntäminen.

Aurinkovoimaa voisi hyödyntää joko sähkö- tai lämpöenergiana. Aurinkovoiman mahdollinen hyödyntäminen lämpimän käyttöveden tuotannossa olisi syytä tutkia etenkin, koska aurinkovoiman investointikustannuksien on ennustettu alkavan laskea tekniikan kehittymisen myötä. Aurinkovoimatutkimuksen avulla voitaisiin varmistua, olisiko aurinkovoimasta todellisuudessa taloudellisesti hyötyä lämpimän käyttöveden lämmittämässä kesäaikaan. Aurinkovoiman hyödyntämismahdollisuuteen vaikuttaa keskeisesti myös rakennusten muoto, sillä aurinkokeräimet ja -paneelit vaativat riittävän suuren kattopinta-alan, jotta voidaan asentaa riittävä määrä aurinkokeräimiä tai -paneeleita. Esimerkiksi tämän tutkimuksen kohderakennukset ovat niin sanottuja pistetaloja eli korkeita pohjapinta-alaan nähden, mikä heikentää aurinkovoiman hyödyntämismahdollisuutta merkittävästi.

3.5.2 Mahdolliset parannusmahdollisuudet esiintyviin ongelmiin

Mahdollisia parannuskeinoja kesänajan lämpimän käyttöveden ongelmiin voisivat olla maalämpöjärjestelmän osatehomitoitus, kompressorien pehmokäynnistimet, aurinkolämmön hyödyntäminen ja lämpötilan säätö varaajassa. Maalämpöjärjestelmän osatehomitoitus on ratkaisu lämmitysongelmaan, jos osa lämpimästä käyttövedestä voidaan tuottaa lisälämmittimen avulla esimerkiksi aurinkovoimalla tai kaukolämmöllä. Tällä hetkellä kaukolämmöllä lisälämmittäminen on taloudellisesti täysin kannattamatonta, sillä kaukolämmön liittymismaksut ovat liian suuret kaukolämmön hyödyntämiseen ainoastaan lisälämmityskäytössä. Jos kuitenkin olisi mahdollista tulevaisuudessa lämpöyhtiöiden kanssa sopia ehdot mahdollisista edullisemmista lisälämmityслиittymismaksuista, saattaisi kaukolämmön hyödyntäminen lisälämmitysjärjestelmänä olla hyvinkin kannattavaa.

Aurinkovoiman hyödyntämisestä lisälämmitysmuotona kerrottiin tässä tutkimuksessa kohdassa 3.5.1, mutta tärkeintä olisi tietää aurinkovoiman hyödyntämismahdollisuudesta se, kuinka paljon aurinkovoiman investointikustannukset saisivat maksaa tuotettua energian kilowattituntia kohden. Järjestelmän investointikustannukset tuotettua energian kilowattituntia kohden olisi rakennuttajan/tilaajan kannalta merkittävä tieto, sillä sen avulla tilaaja voisi tehdä helposti urakoitsijan tarjouksesta päätöksen, kannattaako aurinkovoimaan investoida vai ei.

Kolmas parannusvaihtoehto lämpimän käyttöveden lämmittämisiongelmalle kesäaikana on kompressorien kestävyyttä parantava pehmokäynnistin. Pehmokäynnistin perustuu siihen, että kompressorin käynnistyessä sen sysäysvirtaa pienennetään niin, että jännitealenemat voidaan välttää. Samalla momenttia saadaan pienemmäksi, mikä taas vastaavasti alentaa kompressoriin kohdistuvaa mekaanista rasitusta. Lisäksi pysäytysrampin avulla voidaan välttää pumppujärjestelmien aiheuttamat paineiskut. Näin huollon ja ylläpidon tarve vähenee, ja kompressorin käyttöikä pidentyy. (ABB Oy, 2011)

Neljäs parannusvaihtoehto liittyy kompressorien käyntikertojen ja tuotetun lämpimän käyttöveden määrän optimointiin. Kompressorien käynnistämistä ohjataan kahdella lämminvesivaraajan lämpötila-anturilla, joista toinen on varaajan yläosassa ja toinen alaosassa. Alaosan lämpötila-anturi on määräävä anturi, joka lopulta käynnistää kompressorin, kun varaajan lämpimän veden lämpötila varaajan alaosassa laskee alle sääde-

tyn käynnistyslämpötilan. Jos varaajan alaosan anturin käynnistyslämpötilaa säädetään alemmaksi, tämä harventaa loogisesti myös kompressorin käyntikertoja. Ongelma on kuitenkin siinä, että tällöin myös tuotetun lämpimän käyttöveden määrä vähenee, mikä aiheuttaa yleensä lämpimän käyttöveden puutteen. Näin ollen säätämällä varaaja ja kompressorin toimimaan optimaalisesti voidaan säästää kompressoria ja tuottaa käyntikertoihin nähden mahdollisimman paljon lämmintä käyttövettä. Tämä ratkaisu ei kuitenkaan poista kokonaan ongelmaa lämpimän käyttöveden riittämättömyydestä. (Suomen Lämpöpumpputekniikka Oy, 2012) (Oilon, ei pvm)

4 Uudisrakennuskohteen energialaskelmat

Tutkimuskohde koostuu kolmesta kuusi kerroksisesta uudisasuinkerrostalosta, jotka rakennetaan Espoon Leppävaaraan. Rakennukset ovat muodoltaan, laajuudeltaan ja ilmansuunnaltaan lähes yhteneviä, mutta tarkemman ja paremman tuloksen saamiseksi kaikki kolme rakennusta simuloidaan omina rakennuksinaan. Taulukossa 1 on esitetty asuinkerrostalojen bruttoalat. Kohteeseen lämmitysmuodoksi asennetaan maalämpö, jäähdytysmuodoksi maakylmä, lämmönjakelujärjestelmäksi lattialämmitys sekä lisä- ja varalämmitysmuodoksi sähkölämmitys. Rakennuksien energialaskelmat suoritetaan simuloinnilla, jolla pystytään määrittämään rakennuksien vuositason lämmitys- ja jäähdytysenergian tarpeet. Simuloinnin tuloksista saadaan kohderakennuksen lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmän vuositason ostoenergiankulutus. Lisäksi simulointiohjelmalla mitoitetaan kohteen maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmän tarvitsemat energiakaivot.

Lämmön- ja jäähdytyksentarvesimuloinnin lisäksi kohderakennuksen maalämpöjärjestelmästä tehdään investointilaskelmat, jotta rakennuksen maalämpöjärjestelmän optimointi pystytään laatimaan. Investointilaskelmissa huomioidaan maalämpöjärjestelmän alkuinvestointi sekä tarkastelujaksolla järjestelmiin kohdistuvat huolto- ja korjaustöiden menpiteet. Lisäksi kohteen maalämpöjärjestelmän lämpökaivokenttä mallinnetaan optimaaliseksi kohderakennuksen energiankulutus ja sisäilmaolosuhteet huomioon ottaen. Energiakaivokentän mallintamisesta ja mitoittamisesta kerrotaan lisää luvussa 6. Jotta voidaan verrata vaihtoehtoisten järjestelmien eli maalämpöjärjestelmän sekä kaukolämpö ja -kylmäjärjestelmän elinkaarikustannuksia, kohderakennukseen vaihtoehtoisesti asennettava kaukolämpö- ja kylmäjärjestelmän elinkaarikustannukset lasketaan myös. Elinkaarikustannuksien vertailulla pystytään määrittämään, kumpi ratkaisusta olisi tarkastelujaksolla taloudellisesti kannattavampi.

Taulukko 1. Kohderakennuksien laajuustiedot.

Laajuustiedot:	
Rakennus	brm2
Talo A	2343
Talo B	2119
Talo C	2241
Autohalli	1380
Yhteensä	8083

4.1 Simulointikohteen kuvaus ja tekniset tiedot

Simulointikohteen kolmeen teknisesti lähes samanlaiseen asuinkerrostaloon, joiden lämpimien tilojen kokonaispinta-ala on 6550 m², laaditaan energiasimulointi dynaamisella simulointiohjelmalla IDA Indoor Climate and Energy 4.6.1. ja energiakaivojen mitoitus simulointiohjelman lisäosalla Borehole 1.0. Simuloitavien rakennuksien rakenteet on saatu rakennesuunnittelijalta, ja ne on esitetty taulukossa 2. Sisäilmaolosuhteet ja lämpimän käyttöveden kulutus oletetaan Suomen rakennusmääräyskokoelmien vaatimuksien mukaisiksi. Myös nämä arvot on esitetty taulukossa 2. Simuloinnissa käytettävät rakennuksien kylmäsiltojen lämpöhäviöt joudutaan oletamaan. Simuloinnissa rakennuksiin tehdyt oletukset on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 2. Kohderakennuksien simuloinnissa käytetyt rakenteet, sisäilmasto-olosuhteet ja lämpimän käyttöveden kulutus. (IDA Indoor Climate and Energy, 2012) (Ympäristöministeriö, 2002) (Ympäristöministeriö, 2012)

Rakenteiden oletusarvot		U-arvo (W/m ² K)
Ulkoseinät	D3 2012 ulkoseinä(betoni), lämmin tila	0,17
Sisäseinät	C4 2012 eristämätön sisäseinä	0,32
Sisälattiat	C4 2012 välipohja(betoni)	2,37
Ulkokatto	D3 2012 yläpohja(betoni), lämmin tila	0,09
Ulkolattia	D3 2012 alapohja maata vasten, lämmin tila	0,16
Lasitus	D3 2012 Ikkuna, lämmintila	1
Ovien rakenne	D3 2012 ovi, lämmin tila	1
Ilmanvuotoluku (m ³ /hm ² vaippa)	q50/15 (5-krs rakennus) q50=2 m ³ /hm ²	0,13334
Lasituksen integroitu suojaus	Sälekaihtimet ulompien lasien välissä	

Sisäilmasto-olosuhteet	asetusarvo	yksikkö
Lämmityksen asetusarvo	21	°C
Jäähdytyksen asetusarvo	27	°C
Tulo- ja poistoilmavirta	0,5	l/sm ²
Lattialämmitys (mitoitus)	40	W/m ²
Autohalli	Ei lämmitystä	

Lämpökuormat	asetusarvo	yksikkö
Ihmiset	1,2	MET
Laitteet	4	W/m ²
Valaistus	11	W/m ²

Lämmin käyttövesi	asetusarvo	yksikkö
LKV kulutus	600	l/m2, vuosi
LKV käyttöaste	0,6	

Taulukko 3. Simuloinnissa käytetyt oletukset rakenteissa. (IDA Indoor Climate and Energy, 2012)

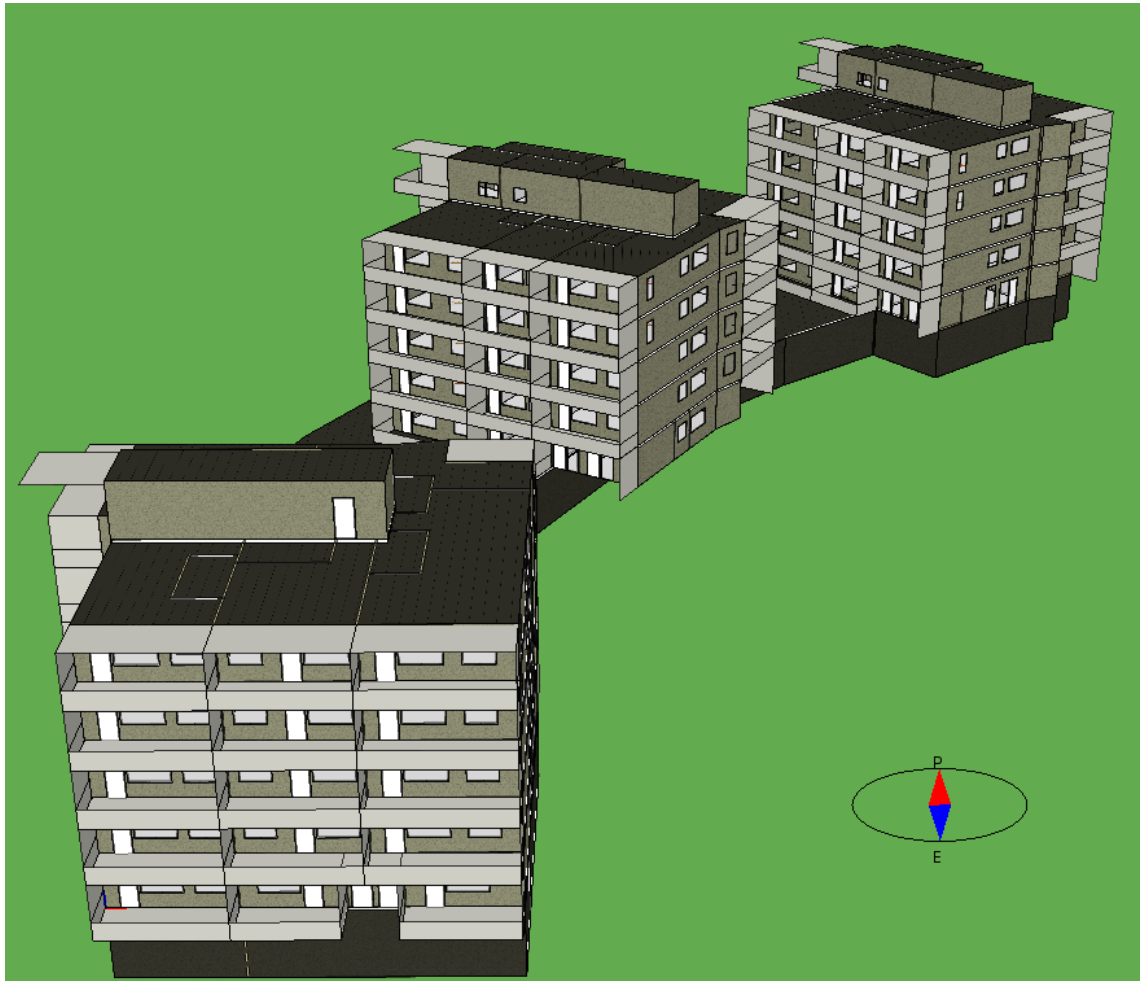
Kylmäsiilat	W/K(m liitos)
Ulkoseinä / alapohja	0,008
Ulkoseinä / sisäseinä	0,008
Ulkoseinä / ulkoseinä	0,048
Ulkoikkunoiden ympärysmitta	0,016
Ulko-ovien ympärysmitta	0,016
Katto / ulkoseinät	0,056
Alapohja / ulkoseinä	0,064
Parvekkeen lattia / ulkoseinä	0,08
Alapohja / sisäseinä	0,008
Ulkokatto / sisäseinä	0,008

Taulukoissa esitettyjen simuloinnin lähtöarvojen mukaan tehdään perusratkaisun simulointi, joka toimii perustana optimoinnille. Maalämpöjärjestelmäratkaisujen simuloinnista kerrotaan lisää kappaleessa 5, jossa rakennuksien maalämpöpumpun tarvitsema energiakaivokenttä mallinnetaan asianmukaisilla maalämpöpumpun mitoituksilla. Rakennuksen energiakulutus mallinnetaan myös, kun rakennuksen lämmitysmuoto on kaukolämpö ja jäähdytysmuoto kaukokylmä, jotta lämmityksen vuosittaisen ostoenergian ja investointikustannuksien optimoinnissa maalämpöjärjestelmän kannattavuutta voidaan verrata kaukolämpö- ja kylmäjärjestelmään. (EQUA Simulation AB, 2013)

4.2 Energialaskelmat ja -simulointi

Energialaskelmat ja -simulointi aloitetaan kohderakennuksien rakenteiden ja vyöhykkeiden mallintamisella. Kolmen asuinkerrostalorakennuksen mallinnus tehdään yhteen IDA-ICE -tiedostoon, koska rakennuksille mitoitetaan vain yksi maalämpö- ja jäähdytysjärjestelmä, joka palvelee kaikkia kohderakennuksia. Mallinnettaessa rakennuksia tarkkuutena käytetään huoneistotasoa, eli rakennukset jaetaan vyöhykkeisiin huoneistoittain. Lisäksi märkätilat erotellaan jokaisessa huoneistossa omaksi vyöhykkeekseen johtuen märkätilojen erilaisesta teknisestä käyttäytymisestä. Kuvassa 21 on esitetty kohderakennuksien mallinnus IDA-ICE -ohjelmistossa. Kuvassa näkyvät myös raken-

nuksien suunnat toisiinsa nähden. Lisäksi kuvassa on esitetty eteläpohjoissuunta. (EQUA Simulation AB, 2013) (Aalto University, 2013)



Kuva 21. Kohderakennuksien mallinnus IDA-ICE -ohjelmistossa. (IDA Indoor Climate and Energy, 2012)

Rakennuksien mallintamisen jälkeen määritellään rakennuksen sijainti, joka tässä tapauksessa määritellään IDA-ICE -ohjelmiston valmiin referenssikaupungin Helsingin mukaan, vaikka kohde sijaitseekin Espoossa. IDA-ICE -ohjelmistoon on valmiiksi tietokannaksi asennettu Helsingin sijainti ja vuoden 2012 säätiedot. Nämä säätiedot ovat riittävän lähellä Espoon sääolosuhteita, jolloin simuloinnissa voidaan käyttää valmista tietokantaa. Säätiedoissa on simuloitu esimerkiksi koko vuoden ulkolämpötilat, aurion säteily ja maanperän säteily. Kun säätiedot on asennettu, määritetään rakennuksien rakenteille ja järjestelmille kuten väli- ja ulkoseinien rakenteille oletusarvot. Rakenteet perustuvat Suomen rakennusmääräyskokoelmien määrittelemiін rakenteisiin. Näin ollen kaikki oletetut rakenteet täyttävät kullekin rakenteelle rakentamismääräyskokoelmissa asetetut maksimi-U-arvot. Myös järjestelmien ominaiskulutukset lisätään. Esimerkiksi

lämpimän käyttöveden kulutukselle määritetään rakennusmääräyskokoelman D3 mukaan ominaisarvo $600 \text{ dm}^3/\text{m}^2$, vuosi käyttöasteella 0,6. Rakennuksien rakenteet ja järjestelmien ominaiskulutukset määritetään myös vyöhykkeittäin eli huoneistoittain, jos huoneistojen välillä on eroja. (IDA Indoor Climate and Energy, 2012) (Ympäristöministeriö, 2012)

Rakenteiden määrittämisen jälkeen määritetään rakennuksen vaipan kylmäsiilat, joita ovat esimerkiksi alapohjan ja ulkoseinän välinen liitos. Kylmäsiiltojen lämpöhäviö määritetään noin kymmeneen prosenttiin koko vaipan lämpöhäviöistä. Kylmäsiiltojen oletetut lämmönsiirtokertoimet on esitetty taulukossa 3. Tämän jälkeen lasketaan Suomen rakennusmääräyskokoelman D3 yhtälön 5 mukaan rakennuksen vuotoilma vaipan pinta-alaa kohden. Rakennuksen ilmanvuotoluvuksi q_{50} luvuksi määritellään $2 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ (Ympäristöministeriö, 2011) (LVI-Suunnittelu Amplan Oy, Ari Virnes, 2013). Rakennusmääräyskokoelman ilmanvuotoluvun laskentayhtälö on esitetty yhtälössä (4.1) seuraavasti:

$$q_{v, \text{vuotoilma}} = \frac{q_{50}}{3600 \cdot x} A_{\text{vaippa}} \quad , \quad (4.1)$$

jossa x on saatu rakennusmääräyskokoelmasta D3, jossa viisi- tai yli viisikerroksisen rakennuksen kertoimeksi on määritelty 15. Yhtälöä (4.1) supistamalla ja jakamalla saadaan yhtälöstä oikeassa yksikössä rakennuksen vuotoilman määrä. Vuotoilman arvo oikeassa yksikössä on $q_{\text{vuotoilma}} = 0,13334 \text{ m}^3/\text{hm}^2_{\text{vaippa}}$. (IDA Indoor Climate and Energy, 2012) (Ympäristöministeriö, 2012) (Ympäristöministeriö, 2002)

Rakennuksiin määritetään myös jakelujärjestelmille oletukset häviöille. Lämpimän käyttöveden lämmönjakojärjestelmälle asetetaan $0,16 \text{ W}/\text{m}^2$ lämpöhäviöt lattia-alaa kohden. Vyöhykkeiden lämmityksen häviöiden oletetaan olevan 1,6 prosenttia lämmitysjärjestelmän kokonaislämmöntuotannosta. Vastaavasti tuloilmakanaviston lämpöhäviöt oletetaan olevan $0,16 \text{ W}/\text{m}^2$ lattia-alaa kohden, kun lämpötilaero kanavan ja vyöhykkeen ilman välillä on $7 \text{ }^\circ\text{C}$. Lisäasetuksena jakeluhäviöt on määritelty kauttaaltaan vain 50 prosenttiin vyöhykkeistä. (IDA Indoor Climate and Energy, 2012)

Rakennuksien eri järjestelmät määritetään vyöhykkeittäin eikä koko rakennuksittain. Vyöhykkeiden asetuksista voidaan määrittää ilmanvaihtolaitteet, lämmityksen huone-

laitteet sekä muut vyöhykkeiden tarkemmat määritykset. Tässä tutkimuksessa järjestelmät määritellään suunnitelmien ja Suomen rakennusmääräyskokoelmien määräyksiin mukaan. Ilmanvaihto määritetään kaikissa vyöhykkeissä Suomen rakennusmääräyskokoelman D3 asuinkerrostalon asetuksen mukaiseksi eli $0,5 \text{ l/sm}^2$. Samassa määritetään sisälämpötilojen raja-arvot lämmitykselle ja jäähdytykselle. Suomen rakennusmääräyskokoelman D3 asetuksen mukaan lämmityksen raja-arvo on $21 \text{ }^\circ\text{C}$ ja jäähdytyksen $27 \text{ }^\circ\text{C}$. Huonekohtaisena lämmitysjärjestelmänä toimii vesikiertoinen lattialämmitys, joka vyöhykkeittäin lisätään vyöhykkeiden lattiarakenteisiin. Samalla määritellään lattialämmityksen asetukset, jotka määrittelevät, millä teholla lattialämmitys maksimissaan toimii, ja mikä on lattiamateriaalin ja lattialämmitysputkien välinen lämmönsiirtokerroin. Lattialämmitys mitoitetetaan jokaiseen vyöhykkeeseen teholle 40 W/m^2 , jolloin maksimiteholla toimiessaan lattialämmitysputkistossa kiertävän meno- ja paluuveden lämpötilaero on $5 \text{ }^\circ\text{C}$. Lisäksi lattialämmityksen veden virtaamaa säädetään, mutta vyöhykkeen lämmityspiirissä ei ole erillistä kiertovesipumppua. Lattiamateriaali, jossa lattialämmitysputket kulkevat, on betoni, joten putkien ja betonin välinen lämmönsiirtokerroin on $30 \text{ W/m}^2\text{K}$. Putket kulkevat lattiapinnasta päin katsottuna kahden senttimetrin syvyydessä betonisessa välipohjalaatassa. (IDA Indoor Climate and Energy, 2012) (Ympäristöministeriö, 2012)

Seuraavaksi määritetään jokaisen vyöhykkeen lämpökuormat ihmisistä, kuluttajalaitteista ja valaistuksesta. Lämpökuorma ihmisistä on 1,2 MET, ja ihmisten lukumäärä on määritetty vyöhykkeen laajuuden mukaan. Ihmisten tuottama lämpökuorma vastaa rakennusmääräyskokoelman D3 asetuksen mukaista 3 W/m^2 lämpökuormaa. Asuinkerrostalon kuluttajalaitteiden lämpökuorma 4 W/m^2 ja valaistuksen 11 W/m^2 ovat määritetty myös SRMK D3:ssa. Nämä lämpökuormat pienentävät energiasimuloinnissa rakennuksen tarvitsemaa lämmityksen tehon tarvetta ja sitä kautta myös vuosittaista ostoenergian tarvetta. Toisaalta lämpökuormista kuluttajalaitteista ja valaistuksesta saatava lämpöenergia syntyy suoraan sähköenergiasta, joka määritetään ostoenergiaksi. (IDA Indoor Climate and Energy, 2012)

Tutkimuksen kannalta merkityksellisin tekijä simuloinnissa on lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien mitoittaminen ja alkutietojen syöttäminen. Perusratkaisun simulointiin asetetaan lämmitysjärjestelmäksi maalämpöpumppu energiakaivoineen, jäähdytysjärjestelmäksi maakyilmä kylmäkaivoineen sekä lisä- ja varalämmitysjärjestelmäksi sähkölämmitys. Järjestelmään asennetaan erikseen energiavaraajat lämpö- ja kylmäenergialle

sekä erillinen energiakaivokenttä. Lämmönjakojärjestelmänä huoneistoissa toimii jo edellä mainittu vesikiertoinen lattialämmitys. Vastaavasti jäähdytysjärjestelmän pääte-laitteena toimii ilmanvaihtokone, jonka puhaltaman ilman jäähdytyspatteri jäähdyttää. Ilmanvaihto tehdään ilmanvaihtokoneella, joka on varustettu lämmöntalteenotolla ja vakioilmavirtasäätimellä. (IDA Indoor Climate and Energy, 2012)

Ilmanvaihtokoneita rakennuksiin on todellisuudessa suunniteltu useampi kuin yksi, mutta simuloinnin yksinkertaistamiseksi oletetaan, että rakennuksissa on vain yksi ja sama vakioilmavirtasäätimellä varustettu ilmanvaihtokone. Ilmanvaihtokoneen tuloilmapuhaltimen SFP-luku on $1,6 \text{ kW/m}^3\text{s}$, mikä merkitsee simuloinnissa käytettävällä ilmanvaihtokoneella sitä, että tuloilmapuhaltimessa paineenkorotus on 960 Pa. Vastaavasti ilmanvaihtokoneen poistoilmapuhaltimen SFP-luku on $1,0 \text{ kW/m}^3\text{s}$, mikä merkitsee simuloinnissa käytettävällä ilmanvaihtokoneella sitä, että poistoilmapuhaltimessa paineenkorotus on 600 Pa. Ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenoton lämpötilasuhde on 0,65. Ilmanvaihtokoneen sisäänpuhalluslämpötilaksi on asetettu $16 \text{ }^\circ\text{C}$, joka kuitenkin hieman nousee vielä tuloilmapuhaltimessa. Myös jäähdytyksen ollessa päällä tuloilman lämpötilan asetusarvo on sama $16 \text{ }^\circ\text{C}$. (IDA Indoor Climate and Energy, 2012)

Rakennuksien lämmityksen päätuotantojärjestelmänä toimii liuos-vesi-lämpöpumppu, joka kerää lämpöenergiaa maahan poratusta lämmönkeruupiiristä. Lämmönkeruupiiriin mitoitus käydään läpi kappaleessa 6. Lämpöpumppu mitoitetaan perusratkaisussa lämmitystehontarvelaskennassa saadun lämmitystehon tarpeen mukaan kattamaan 100 prosenttia lämmitystehon tarpeesta. Lämpöpumppu mitoitetaan siis kattamaan 120 kW:n lämmitysteho. Lämpöpumpun toimintalämpötilat ovat liuoksen osalta $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ja veden osalta $35 \text{ }^\circ\text{C}$. Lämpöpumppu lämmittelee vettä neljän kuution lämminvesivaraajaan, johon on liitetty sekä tilojen että ilmanvaihdon lämmönjakelupiiri ja lämpimänkäyttöveden lämmityskierukka. Lämpimän käyttöveden valmistuksessa tarvitaan osittain apuna lisälämmitintä, jotta saadaan tuotettua tarpeeksi kuumaa vettä energiavaraajaan. Lisälämmitin on simuloinnissa teholtaan rajoittamaton suorasähkölämmitin. Todellisuudessa lisälämmittimenkin teho olisi kuitenkin rajoitettu.

Tilojen lämmitykseen lämpöpumpun tuottama noin $35 \text{ }^\circ\text{C}$ asteinen vesi soveltuu erinomaisesti, sillä lattialämmityksen säätökäyrä on asetettu seuraavasti. Kun ulkolämpötila on $-26 \text{ }^\circ\text{C}$ tai enemmän, lattialämmityksen menoveden lämpötila on $35 \text{ }^\circ\text{C}$. Kun vastaavasti ulkolämpötila nousee nollaan Celsius-asteeseen, lattialämmityksen menoveden

lämpötila laskee 29 °C:een. Ulkolämpötilan ollessa 20 °C astetta myös lattialämmityksen menoveden lämpötila on 20 °C. Edellä mainittujen säätökäyrän pisteiden välillä säätökäyrä on lineaarinen eli suora viiva määritellystä pisteestä toiseen. (IDA Indoor Climate and Energy, 2012)

Rakennuksen jäähdytyksen päätuotantojärjestelmänä simuloinnissa toimii liuos-vesijäähdytin, joka on liitetty samaan maahan porattuun lämmönkeruupiiriin kuin lämmityksen lämpöpumppu. Liuos-vesijäähdytin mitoitetaan kattamaan 2/3 lämmityksen lämpöpumpun tehosta eli jäähdytyksen lämpöpumppu toimii maksimissaan 80 kW teholla. Lämmityksen lämpöpumpun tapaan jäähdytin toimii lämpötiloissa 0 °C (liuos) ja 35 °C (vesi). Jäähdytin on liitetty neljän kuution kylmävesivaraajaan, johon vastaavasti on liitetty ilmanvaihtokoneen jäähdytyspatterin verkosto. Jäähdytyspatterissa jäähdytyksen lämmönsiirtoneste lämpenee 5 °C ottaen vastaan tuloilmasta saatavaa lämpöenergiaa, ja siirtää tämän lämmönkeruupiirin välityksellä maahan. Rakennuksiin mallinnettavat liuos-vesijäähdytin ja kylmävesivaraaja ovat mukana simuloinnissa ainoastaan simuloinnin yksinkertaistamiseksi. Todellisuudessa jäähdytys toteutetaan suoraan vapaajäähdytyksenä, jossa suoraan maassa kulkevasta lämmönkeruupiiristä kierrätetään kiertopumpulla noin 0 – 5 °C lämmönkeruuneste ilmanvaihtokoneen jäähdytyspatterin läpi jäähdyttäen tuloilman asetuksissa määritellylle tasolle tai ainakin hieman viilentäen tuloilmaa. (IDA Indoor Climate and Energy, 2012)

Taulukossa 6 on esitetty perusratkaisun maalämpöjärjestelmän perusmitoitustiedot, jotka edellä olevissa kappaleissa on esitetty sanallisesti. Lisäksi taulukko 6 sisältää perusratkaisun lämmönkeruupiirin tietoja, kuten energiakaivojen lukumäärän, energiakaivojen sijainnin toisiinsa nähden sekä energiakaivojen syvyyden. Energiakaivojen mitoittaminen tarkemmin käydään läpi kappaleessa 6.

Taulukko 4. *Perusratkaisun maalämpöjärjestelmän perusmitoitustiedot.* (IDA Indoor Climate and Energy, 2012)

Maalämpöjärjestelmä		
Liuos-vesi-lämpöpumppu	Teho (kW)	120
Liuos-vesi-lämpöpumppu	Lämpötilat (°C)	0/35
Liuos-vesi-jäähdytin	Teho (kW)	70
Liuos-vesi-jäähdytin	Lämpötilat (°C)	0/35
Lämpökaivot (muodossa 3 x 4) -1 kaivo	Lukumäärä kpl	11
Lämpökaivojen syvyys	metriä (m)	300
Etäisyys toisistaan noin	metriä (m)	20
Lämminvesivaraaja	Koko (m3)	4
Kylmävesivaraaja	Koko (m3)	4
Lisälämmitin (sähkö)	COP	1
LKV menovesi	Lämpötila (°C)	55
IV lämmitys: lämpötilat (meno/paluu)	Lämpötilat (°C)	(55/35)
IV jäähdytys: lämpötilan lasku patterissa	Lämpötilaero (°C)	5
Lattialämmitys: maksimi menovesi	Lämpötila (°C)	35

Tulokseksi perusratkaisun simuloinnista saadaan, että ostoenergiankulutus tuotantomuodon kerroin huomioon ottaen on 120 kWh/m²/vuosi. Ostoenergiankulutus sisältää kuluttajalaitesähkön ja valaistukseen kuluvaan sähkön osuudelta 35 kWh/m²/vuosi. Nyt, kun perusratkaisun ostoenergiankulutus on simuloitu, voidaan myöhemmin suorittaa maalämpöjärjestelmän optimointi. Optimoinnin päätösmuuttujia ovat maalämpöpumpun teho, energiakaivojen syvyys sekä lämmönsiirtonesteen massavirta. Optimoinnin lähtötiedot, suoritus ja tulokset esitetään kappaleissa 7 ja 8. (IDA Indoor Climate and Energy, 2012)

4.3 Maalämpöpumpun mitoitus

Maalämpöpumppu voidaan mitoittaa kattamaan koko rakennuksen tai rakennuksien lämmitystehon enimmäistarve tai vain osan siitä. Rakennuksen lämmitystehon enimmäistarve yleensä sisältää tilojen, ilmainvaihdon ja lämpimän käyttöveden lämmittämiseen tarvittavan maksimilämmitystehon. Lämpöpumpun maksimilämmöntuotto voidaan mitoittaa siis energiankulutuslaskelmien avulla myös kattamaan vain jotain haluttua osaa maksimilämmitystehosta esimerkiksi 90%, 70% tai 50% rakennuksen maksimilämmitystehon tarpeesta (Holopainen, et al., 2010). Osatehomitoitus mitoitetaan vastaamaan yleensä noin 50 – 70 % rakennuksen lämmityksen enimmäistehon tarpeesta. Täl-

löin lämpöpumppu voi maksimissaan tapauksesta riippuen tuottaa noin 60 – 98 % rakennuksen vuotuisesta kokonaislämmitysenergian tarpeesta. (Eskola, et al., 2012)

Toinen tärkeä asia, joka lämpöpumpun mitoituksessa otetaan huomioon, on lämpöpumpun lämpökertoimen vähimmäisvaatimuksen asettaminen ja toteuttaminen. Nykyään suunnitteluvaiheessa lämpökertoimen COP vähimmäistasoksi asetetaan 3,5 – 4. Lämpökertoimen määrittäminen on esitetty yhtälössä (2.1). Simuloinnilla pystytään määrittämään erilaisilla lämpöpumppujärjestelmä-vaihtoehtoilla saavutetut lämpökertoimet. Näin pystytään mitoittamaan sellainen järjestelmä, jolla saavutetaan lämpökertoimen vähimmäisvaatimus. Etenkin sähkölaskun maksajan eli usein käyttäjän kannalta lämpökerroin on merkittävässä roolissa, sillä mitä pienempi lämpökerroin on, sitä enemmän järjestelmä todennäköisesti kuluttaa sähköä. Myös kiertopumppujen lukumäärä ja koko vaikuttavat lämpökertoimeen, sillä niiden kuluttama sähköenergia huomioidaan lämpökertoimen laskennassa.

Lämpöpumpun mitoituksen yhteydessä määritetään myös tarvittavien energiakaivojen lukumäärä. Riippuen siitä, kuinka suurelle maksimiteholle lämpöpumppu mitoitetaan, määräytyy sen mukaan energiakaivojen lukumäärä ja lämmönsiirtonesteen massavirta. Lämmönsiirtonesteen massavirran oikealla mitoituksella pystytään vaikuttamaan lämmönsiirtonesteen lämpötiloihin ja sitä kautta energiakaivon ja maaperän lämpövirtoihin.

Lämpöpumpun mitoitukseen vaikuttaa myös se, millä lämpötila tasoilla järjestelmän halutaan toimivan. Jos lämpöpumpuksi halutaan mitoittaa tulistinlämpöpumppu eli käyttöveden lämmittämiseen paremmin soveltuva lämpöpumppu, tarvitsee lämpöpumpun toimintalämpötiloja nostaa. Tämä kuitenkin heikentää merkittävästi lämpökerrointa, koska lämpöpumppu kuluttaa tällöin enemmän sähköenergiaa. Lämpöpumput ovatkin lämpökertoimeltaan tehokkaimmillaan tilojen lämmittämisessä lattialämmityksellä, jossa lämpötilat eivät nouse kovinkaan suuriksi.

4.3.1 Maalämpöpumpun mitoituksen lähtötiedot

Maalämpöpumpun mitoituksen lähtötiedot tässä tutkimuksessa lasketaan ja simuloidaan dynaamisella simulointi-ohjelmalla IDA-ICE:lla. IDA-ICE -ohjelmistoon mallinnettujen rakennuksien lämmitystehontarve sekä vuotuinen lämmöntarve saadaan suoraan simuloinnin tuloksista, kun simulointi on tehty koko vuoden ajalta. IDA-ICE -

ohjelmistolla mitoitetaan myös maalämpöjärjestelmän vaatima energiakaivokenttä. Energiakaivokentän mitoituksen maaperän tiedot saadaan suoraan tontille tehdyn TRT-mittauksen tuloksista.

Lämpöpumpun mitoituksen ensimmäinen vaihe on päättää, kuinka suuri osa rakennuksien lämmitystehontarpeesta maalämpöpumpulla halutaan kattaa. Tässä tutkimuksessa lähtökohtaisesti maalämpöpumpulla halutaan kattaa koko rakennuksen lämmitystehontarve. Lisäksi COP-lämpökertoimen tavoitearvoksi on asetettu 3,5, jonka saavuttamiseksi lämpöpumppujärjestelmän pitää olla hyvinkin energiatehokas. Lämpökertoimen saavuttamisen haastetta lisää se, että mitoitettavaksi lämpöpumpuksi määritetään tulislämpöpumppu. Lopuksi mitoitetaan energiakaivokenttä optimaaliseksi maalämpöjärjestelmälle, siten kuitenkin, että myös lämpökerroinvaatimus toteutuu. Lämpöpumpun ja koko järjestelmän mitoituksessa ei saa unohtaa energiakaivokentän jäätyminen mahdollisuutta. Toisin sanoen, lämmönkeruuputkisto ei saa aiheuttaa liian suurta kuormitusta maaperään. Jäätyminen riski voidaan mitoittaa pois seuraamalla simuloinnin tuloksista saatuja lämmönsiirtonesteen lämpötiloja.

4.3.2 Lämmitys- ja jäähdytysteho

Perusratkaisun simuloinnissa lämmitystehontarpeeksi saadaan 120 kW, joten tämä on rakennuksen maksimilämmitystehontarve. Maalämpöpumppu siis mitoitetaan saadun lämmitystehontarpeen arvon mukaan joko täysin lämmitystehontarpeen tai osan lämmitystehontarpeesta kattavaksi. Taulukossa 5 on esitetty täystehomitoituksen lisäksi osatehomitoituksen maalämpöpumpun tehot, jotka on saatu kertomalla maksimiteho esitetyillä prosenttiosuuksilla. Nämä lämpöpumpun tehot ovat myös optimoinnissa käytettäviä lämpöpumpun tehon päätösmuuttuja-arvoja.

Taulukko 5. Lämpöpumpun lämmitystehot eri osatehomitoituksille.

Maalämpöpumppu	Max MLP lämmitysteho (kW)
Max MLP lämmitysteho (100%)	120
Max MLP lämmitysteho (80%)	100
Max MLP lämmitysteho (70%)	80
Max MLP lämmitysteho (60%)	70
Max MLP lämmitysteho (50%)	60
Max MLP lämmitysteho (35%)	40

Jäähdytystehoksi maalämpöjärjestelmään valitaan 80 kW, joka on noin 2/3 maalämpöjärjestelmän maksitehosta, kun järjestelmä on mitoitettu kattamaan sataprosenttisesti lämpöenergiankulutus. Simuloinnissa jäähdytys asetetaan toimimaan lämpöpumpun kautta, koska vapaajäähdytystä ei ole vaihtoehtona. Näin ollen saadaan simuloitua jäähdytyksen vaikutukset kesäaikana rakennuksen sisälämpötiloihin ja energiankulutukseen. Vaikka jäähdytys toteutettaisiinkin vapaajäähdytyksenä, kuluttaa maajäähdytysjärjestelmä ainakin kiertopumpun sähkönkulutuksen verran sähköenergiaa.

5 Uudisrakentamiskohteen investointilaskelmat

Rakennukseen tehdyt investointilaskelmat määrittelevät järjestelmän tai rakenteen investoinnin taloudellisen kannattavuuden. Tässä tutkimuksessa tutkitaan maalämpöjärjestelmän kannattavuutta asuinkerrostaloissa, joten merkitsevimpiä lukuja ovat maalämpöjärjestelmän investointikustannukset ja ostoenergian kustannukset. Investointikustannukset sisältävät alkuinvestoinnin sekä huolto- ja korjauskustannukset. Ostoenergian kustannukset sisältävät vastaavasti kaiken rakennuksen ulkopuolelta ostetun energian kustannukset. Tutkimuksessa pyritään siis minimoimaan investointikustannuksista ja ostoenergiasta aiheutuvat kustannukset eli toisin sanoen optimoimaan maalämpöjärjestelmä. Rakennuksen rakenteet oletetaan samanlaisiksi jokaisessa järjestelmäratkaisussa, joten vain lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmiin liittyvät kustannukset pitää ottaa huomioon.

5.1 Tutkimuksen investointilaskelmien metodiikka

Investointilaskelmien perusongelma on, että eri menoerät, tuotot ja investoinnit sijoittuvat eri ajankohdille, ja näin korko vaikuttaa pääomaerien suuruuteen eikä pääomaeria voida laskea yhteen sellaisenaan. Pääomaerät pitää siirtää johonkin valittuun ajankohtaan elinkaarta korko- ja diskonttaustekijöiden avulla. Pääomaerät siirretään usein vastaamaan nykyhetken arvoa, joten käytetään myös tässä tutkimuksessa nykyarvomenetelmää. Nykyarvomenetelmä on yksi käytetyimpiä investoinnin kannattavuuden arviointimenetelmiä, ja se ottaa huomioon rahan aikariippuvuuden. Pääomien siirto nykyhetkeen voidaan laatia käyttämällä kustannusfunktioita, joka on esitetty yhtälössä (5.1) seuraavasti: (Siren, 2010)

$$P = \sum tuotot|_{t=0} - \sum kulut|_{t=0} - \sum investoinnit|_{t=0} + j\ddot{a}nn\ddot{o}sarvo|_{t=0} . \quad (5.1)$$

Perinteisen hankkeen kustannusfunktion arvosta voitaisiin sanoa karkeasti, että jos arvo on positiivinen luku, hanke on kannattava ja jos negatiivinen luku, hanke on tappiollinen. Korolla kuitenkin määritellään, kuinka suuri tavoiteltu voitto pitää olla, jotta voidaan hanketta pitää taloudellisesti kannattavana. Absoluuttinen kannattavuus voidaan määritellä, jos asetetaan korko nollassa. Lisäksi jos halutaan vertailla eri investointien

nykyarvoja selvittäessä taloudellisesti kannattavinta investointia, suurimman nykyarvon antava investointi on kannattavin. (Siren, 2010)

Nykyarvomenetelmässä diskontataan kaikki tuotot, kulut ja investoinnit nykyhetkeen ja lasketaan ne yhteen. Nykyarvomenetelmän yhtälö voidaan kirjoittaa yleisesti yhtälössä (5.2) esitettyyn muotoon: (Siren, 2010)

$$P = \sum_{k=1}^n \frac{T_k}{(1+i)^k} - \sum_{k=1}^n \frac{K_k}{(1+i)^k} - I_0 + \frac{S}{(1+i)^n}, \quad (5.2)$$

jossa P on nykyarvo, T_k ja K_k ovat vuoden k tuotot ja kulut, I_0 on alkuinvestointi ensimmäisen vuoden alussa ja S on jäännösarvo vuoden n lopussa ja i on valittu laskentakorko. (Siren, 2010)

Investointilaskelmissa ja täten myös nykyarvomenetelmässä esiintyvä laskentakorko on merkittävä tekijä energiainvestointilaskelmissa. Energiainvestointien laskelmissa laskentakorkoon vaikuttaa kolme tekijää: nimelliskorko, inflaatio ja eskalaatio. Nimelliskorko ilmaisee investoinnille asennetun tuottovaatimuksen, inflaatio kustannustason nousun tai laskun ja eskalaatio tietyn tuoteryhmän eli tässä energian hinnan keskimääräisen nousun ajan mukana verrattuna yleisen hintatason nousuun. Nimelliskoron investoinnin tekijä saa itse määrittää, mutta koron valintaan vaikuttavat muun muassa erinäiset riskitekijät. Inflaatioon vaikuttavat rahan arvon muutokset, jotka aiheutuvat tässä tutkimuksessa energian kysynnän ja tarjonnan tasapainosta. Inflaatiota mitataan kuluttajaindeksillä ja sen muutoksilla. Inflaation huomioon ottava reaalikorko lasketaan kaavalla (5.3): (Siren, 2010)

$$r_i = \frac{i - f_{\text{inf}}}{1 + f_{\text{inf}}}, \quad (5.3)$$

jossa r_i on reaalikorko ja i nimelliskorko.

Kolmas investoinnin korkoon vaikuttava tekijä, eskalaatio, kuvaa tässä tutkimuksessa energian hinnankehitystä verrattuna yleisen hintatason kehittymiseen. Energian hintataso muuttuu usein eri tavoin kuin yleinen hintataso, mikä johtuu maailmanpoliittisesta

tilanteesta ja energian saannin vaihteluista. Tästä syystä etenkin energian hintaa tarkasteltaessa eskalaatio on merkittävä tekijä. Eskalaation tehtävä on esittää energian hinnan inflaation poikkeaman yleisestä inflaatiosta. Eskalaation huomioon ottavalle korolle voidaan johtaa myös lauseke niin kuin reaalikorollekin. Eskalaation huomioon ottava koron laskukaava on esitetty kaavassa (5.4). (Siren, 2010)

$$r_e = \frac{r_i - e}{1 + e} \quad (5.4)$$

jossa r_e on eskalaation huomioonottava korko, r_i reaalikorko ja e eskalaatio. Eskalaatio voi olla positiivinen, jolloin energian hinnan inflaatio on yleistä inflaatiota voimakkaampi, tai se voi olla negatiivinen, jolloin energian hinnannousu on yleistä hinnannousua hitaampi. Energiainvestointilaskelmissa tätä eskalaation huomioonottavaa korkoa, voidaan käyttää nykyarvomenetelmän kaavassa (5.2) investointiin valittuna laskentakorkona. (Siren, 2010)

Investoinnin kannattavuutta voidaan mitata myös takaisinmaksumenetelmällä, mutta tämä tapa on heikompi kuin yleisesti käytössä oleva nykyarvomenetelmä. Takaisinmaksumenetelmän ideana on selvittää, kuinka kauan menee aikaa, kun investointi maksaa itsensä takaisin. Takaisinmaksumenetelmän etuja ovat havainnollisuus ja yksinkertaisuus, joten menetelmän avulla voidaan tehdä nopeita suuntia antavia arvioita investoinnin kannattavuudesta. Takaisinmaksuajan menetelmän tueksi olisi kuitenkin aina hyvä ottaa jokin kehittyneempi menetelmä, sillä takaisinmaksuaika ei ota mitenkään huomioon takaisinmaksuajan jälkeisiä tuottoja. Myös koron vaikutus jätetään usein huomioimatta takaisinmaksuajan menetelmässä. Takaisinmaksuajan yhtälö muodostetaan samalla lailla kuin nykyarvomenetelmän yhtälö, mutta takaisinmaksuajan menetelmässä asetetaan nykyarvon kustannusfunktio nolllaksi. Tämän jälkeen ratkaistaan takaisinmaksuaika n vuosissa. Takaisinmaksuajan yhtälö on esitetty seuraavaksi:

$$P = \sum_{k=1}^n \frac{T_k}{(1+i)^k} - I = 0, \quad (5.5)$$

jossa T_k on vuoden k tuotto ja i on laskentakorko, joka asetetaan nolllaksi.

Energiainvestointien takaisinmaksuaikavaatimukset ovat yleensä 2 – 10 vuotta. Tässä tutkimuksessa laskettujen energiantuotantoinvestointien takaisinmaksuaikojen pitäisin olla maksimissaan viiden ja seitsemän vuoden välillä, jotta investointi olisi asiakkaalle taloudellisesti kannattava. Takaisinmaksuaikaa voidaan verrata myös investoinnin käyttöikä. Tällöin investointi on ainakin taloudellisesti kannattamaton, jos takaisinmaksuaika on pitempi kuin investoinnin käyttöikä.

5.2 Tutkimuksen investointilaskelmat

Tutkimuksessa laaditaan maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmän optimointi, joten tarvittavia investointikustannuksia ovat erikokoisten maalämpöpumppujen kustannukset asennettuna, energianvaraajien kustannukset asennettuna, lämmönkeruupiirin kustannukset asennettuna, jäähdytykseen liittyvät kustannukset sekä muut asennuksiin ja liittämisiin liittyvät kustannukset. Lisäksi tarvitaan sähköenergian ja sähkönsiirron hinta kilowattituntia kohden sekä maalämpöjärjestelmään liittyvät huoltokustannukset. Tutkimuksessa verrataan myös maalämpöjärjestelmän kannattavuutta kaukolämpöjärjestelmään. Kaukolämpöjärjestelmässä on sama lämmönjakojärjestelmä kuin maalämpöjärjestelmässä, joten jakojärjestelmän kustannusta ei tarvitse ottaa huomioon. Kaukolämpöjärjestelmän kustannuksista tarvitaan siis kaukolämmön alakeskuksen hinta asennettuna, kaukokylmän siirtimen hinta, alakeskukseen liittyvien asennuksien hinta, kaukolämmön kustannus kilowattituntia energiaa kohden sekä kaukolämmön liittymismaksu.

Laskettaessa maalämmön ja kaukolämmön nykyarvoa kolmenkymmenen vuoden ajalta tarvitsee ensin laskea laskentakorot, jotka ottavat inflaation ja eskalaation huomioon. Lisäksi investointien nimelliskoroksi määritetään 6 prosenttia, jotta korko kattaa lainarahalla investoitujen järjestelmien korkokustannukset. Lisäksi korko mahdollistaa eri vuosina tulevien tuottojen ja kuluerien vertailun investoinnin syntyhetkellä. Taulukossa 6 on esitetty korkolaskelmissa käytetyt inflaatio ja eskalaatiot. Lämpö- ja sähköenergialle saadaan laskettua nykyarvomenetelmän laskentayhtälössä käytetty korot tämän tutkimuksen yhtälöiden (5.3) ja (5.4) avulla. Myös nämä korot on esitetty taulukossa 6. Korkolaskelmien lisäksi tarvitaan kaukolämpö- ja sähköenergialle hinnat. Nämä hinnat on esitetty taulukossa 7. Kaikki taulukon hinnat sisältävät arvonlisäveron 24%.

Taulukko 6. *Laskentakorot.*

Laskentakorot		
Maalämpöratkaisun nimelliskorko	6	%
Kaukolämpöratkaisun nimelliskorko	6	%
Yleinen inflaatio	1	%
Sähköenergian eskalaatio	3	%
Kaukolämpöenergian eskalaatio	2	%
Laskettu sähköenergian laskentakorko $r_{e,sähkö}$	1,89	%
Laskettu kaukolämpöenergian laskentakorko $r_{e,lämpö}$	2,89	%

Taulukko 7. *Energioiden hinnat sekä kaukolämmön liittymismaksu.*

Energian hinnat (sis. ALV 24%)		
Sähköenergian perusmaksu (Fortum Oy, 2014)	4,02	€/kk
Sähköenergian hinta (sis. sähköveron) (Fortum Oy, 2014)	0,0822	€/kWh
Sähkön siirron perusmaksu (Caruna Espoo Oy, 2014)	2,95	€/kk
Sähkön siirron hinta (Caruna Espoo Oy, 2014)	0,0271	€/kWh
Kaukolämmön liittymismaksu (Espoo) (Energiateollisuus, 2014)	24 800	€
Kaukolämmön tehomaksu (Espoo) (Energiateollisuus, 2014)	15,31	€/MWh
Kaukolämmön energiamaksu (Espoo) (Energiateollisuus, 2014)	64,36	€/MWh
Kaukokylmän energiamaksu (Helsingin energia, 2014)	33,95	€/MWh

Taulukko 8. *Investointikustannukset.*

Investointikustannukset (sis. ALV 24%)		
Lämpöpumppujärjestelmän kokonaisurakan keskimääräinen kustannus maalämpöpumpun tehoa kohden (ilman energiakaivojen kustannusta) (Lämpöykkönen, 2014)	666,7	€/kW
Energiakaivojen investointikustannus (Lämpöykkönen, 2014)	40	€/m
Vapaakylmän investoinnin lisäkustannus (Haahtela, 2014)	16195	€
Kaukolämmön ja -kylmän investointikustannus (Haahtela, 2014)	54257	€
Maalämpöjärjestelmän vuosittainen huoltokustannus (Lämpöykkönen, 2014)	500	€
Kompressorin vaihdon kustannus joka kymmenes vuosi (Lämpöykkönen, 2014)	5000	€

Investointikustannuksissa on otettu huomioon arvonlisävero 24 %. Lisäksi kaikki investointikustannukset sisältävät asennukseen kuuluvat kustannukset.

6 Energiakaivokentän mallintaminen uudisrakennuskohteeseen

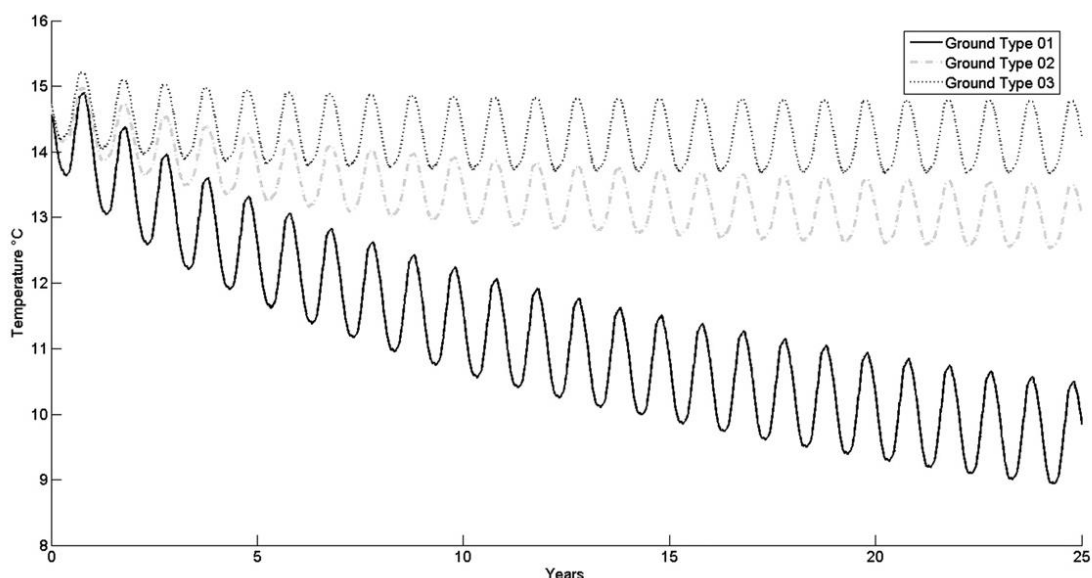
Energiakaivokenttä mallinnetaan IDA-ICE -ohjelmiston lisäosalla Boreholes 1.0, johon voidaan syöttää maaperän lämmönjohtavuus- ja lämpötilatiedot. Kun rakennus on rakenteiltaan ja järjestelmiltään syötetty simulointiohjelmaan, voidaan aloittaa rakennuksien yhteisen maalämpöjärjestelmän energiakaivokentän mitoittaminen. IDA-ICE -ohjelmistossa energiakaivojen mitoitus tehdään primäärijärjestelmän asetuksissa. Energiakaivojen mitoituksen alussa perinteinen yhden reiän energiakaivo korvataan edellä mainitulla Boreholes 1.0 -mallilla, joka mahdollistaa suurempien kuin yhden kaivon energiakaivokenttien mallintamisen ja mitoittamisen siten, että energiakaivot vaikuttavat toistensa ominaisuuksiin ja käyttäytymiseen. Jos esimerkiksi energiakaivot mitoitetaan asemiltaan liian lähelle toisiaan, on mahdollisuus, että energiakaivokenttä jäätyy talvella. Tällöin koko maaperä jäätyy, mikä saattaa johtaa lämpövirtojen pienenemiseen maaperässä. Syy lämpövirtojen pienenemiseen jäätymisen yhteydessä on, ettei vesi pääse jäätyessään liikkumaan esteettä maaperässä yleensä kallioperässä, ja näin siirtämään maan lämpöenergian lämmönkeruuputkistossa liikkuvaan lämmönsiirtonesteeseen.

Energiakaivojen mitoitusta Boreholes 1.0 mallissa jatketaan asettamalla energiakaivojen tekniset ominaisuudet, kuten määritetään, ovatko energiakaivojen sisällä kulkevat lämmönkeruuputket yksinkertaisia vai kaksinkertaisia U-putkia. Lisäksi lämmönkeruuputkille ja energiakaivoille asetetaan dimensiot, kuinka suuria ovat keruuputkien ja lämpökaivojen halkaisijat sekä kuinka suuri on keruuputken materiaalipaksuus. Samassa määritetään myös energiakaivojen syvyydet. Tässä tutkimuksessa asetetaan perusratkaisun energiakaivojen syvyydeksi 300 metriä, joka saattaa muuttua, kun optimoidaan maalämpöjärjestelmän aiheuttama ostoenergiankulutus muun muassa energiakaivojen syvyyttä muuttamalla. Kun dimensiot on määritelty, määritetään energiakaivokentän reikien eli energiakaivojen lukumäärä. Tässä tutkimuksessa perusratkaisun energiakaivojen lukumääräksi asetetaan 11 energiakaivoa, joka perustuu aiemmin tehtyyn TRT-testiin ja testin perusteella EED-mitoitusohjelmalla tehtyihin laskelmiin. Energiakaivojen määrän asettamisen jälkeen määritetään energiakaivojen asemat suhteessa toisiinsa sekä rakennuksiin. Energiakaivojen sijainti määritellään saman koordinaatiston suhteen kuin mitä rakennuksetkin aiemmin määriteltiin. Energiakaivoille annetaan siis koordinaatit sekä x- että y-akselille. Sijainnin lisäksi energiakaivot voidaan simuloida kulkemaan myös vinosti maan normaaliin nähden jossakin halutussa kulmassa. Kulman asettaminen energiakaivoille on erityisen hyödyllinen tilanteissa, joissa energiakaivot

joudutaan tontin tai maaperän rajoitteista asentamaan todella lähelle toisiaan. Tällöin kulmien avulla saadaan energiakaivot kulkemaan kauempana toisistaan, ja näin energiakaivokenttä toimii todennäköisesti paremmin.

Tässä tutkimuksessa perusratkaisussa oletetaan kuitenkin rakennuksien tontin riittävän energiakaivojen mitoittamiseen ja rakentamiseen pystysuoraan. Rakennustontti saattaa kuitenkin tulla rajoittavaksi tekijäksi optimoitaessa kentän kokoa, sillä energiakaivojen määrän kasvaessa liian suureksi energiakaivot eivät enää mahdu rakennustontille. Tällöin joudutaan asettamaan optimointiin energiakaivojen maksimimääräksi se, joka mahtuu rakennustontille järkevällä sijoittamisella. Myös taloudellisuus ja maalämpöjärjestelmän toimivuus saattavat rajoittaa energiakaivojen maksimimäärää. Lopputulos selviää optimoimalla energiakaivojen lukumäärä. Maalämpöjärjestelmän toimivuus selviää simuloinnin tuloksista maalämpöjärjestelmän lämmönsiirtonesteiden lämpötiloista, jotka pitää olla sallituissa rajoissa.

Energiakaivojen mitoitukseen vaikuttavat merkittävästi myös maaperän ominaisuudet, jotka pystytään tutkimaan TRT-mittauksella. Jos TRT-mittauksella ei ole rakennuskohteen maaperään tehty, on IDA-ICE -ohjelmistossa oletuksena Helsingin keskimääräisen maaperän ominaisuudet, joilla voidaan myös energiakaivojen mitoitus laatia. TRT-mittauksen tulokset maaperän ominaisuuksista ovat kuitenkin paras tapa varmistaa rakennettavan maalämpöjärjestelmän toimivuus, sillä maaperän ominaisuuksilla on eroja pienilläkin alueilla erilaisen maaperän koostumuksen vuoksi. Esimerkiksi Suomen kallioperän kivilajien lämmönjohtavuuksissa on suuria eroja, jotka voivat vaikuttaa merkittävästi energiakaivojen määrään ja syvyyteen. Graniitin keskimääräinen lämmönjohtavuus on n. 3,4 W/mK ja kiilleliuskeen 2,0 W/mK (GTK, 2011). Jos tarkastellaan kuvaa 22, voidaan huomata, että etenkin pitkällä tarkasteluvälillä maaperän lämmönjohtavuus vaikuttaa maaperän keskilämpötilaan merkittävästi.



Kuva 22. Maaperän keskiarvo lämpötila 25 vuoden ajalta kolmella eri maaperän lämmönjohtavuudella. Lämmönjohtavuudet kuvassa ovat Ground type 01: 0,5 W/mK, Ground type 02: 1,7 W/mK ja Ground type 03: 3,5 W/mK. (Desideri, et al., 2011)

Näin ollen, jos vain on mahdollista saada simuloinnin lähtötiedoiksi maaperän ominaisuudet TRT-mittauksen tuloksista, on suositeltavaa tehdä simulointi mittauksesta saaduilla maaperän ominaisuuksilla. Erityisesti simuloinnin ja mitoituksen kannalta merkittävimpiä maaperän ominaisuuksia ovat maaperän lämmönjohtavuus, energiakaivojen keskilämpötila sekä porakaivon lämmönvastus. Edellä mainitut ominaisuudet ovat erityisen hyvät, jos maaperä koostumus on graniittia. Tämän tutkimuksen maaperään on tehty TRT-mittaus, joten tutkimuksessa käytetään maalämpöjärjestelmän toimivuuden takaamiseksi TRT-mittauksen tuloksista saatuja maaperän ominaisuuksia.

Maaperän ominaisuudet ovat tärkein energiakaivojen mitoittamiseen ja mallintamiseen vaikuttava tekijä, mutta mitoitukseen vaikuttaa myös energiakaivon materiaalien ja lämmönsiirtonesteiden ominaisuudet. Energiakaivo täyttyy porattaessa useimmiten pohjavedellä, jonka liike edistää maalämpöjärjestelmän toimintaa sekä lämmityksessä että viilennyksessä. Muissa tapauksissa energiakaivot täytyy täyttää joko bentoniitillä tai betonilla, jotka ajaisivat liikkuvan pohjaveden aseman energiakaivon lämmönsiirron osatekijänä. Pohjavesi, joka virtaa itsenäisesti energiakaivoon, on siis edullinen luonnonilmiö maalämpöjärjestelmän toiminnan kannalta. Muuten jouduttaisiin investoimaan bentoniittiin tai betoniin, jotka aiheuttaisivat maalämpöjärjestelmän kannattavuutta heikentäviä lisäkustannuksia. (GTK, 2011)

6.1 Simulointikohteeseen mitoitettavien ja mallinnettavien maalämmön energiakaivokenttien lähtötiedot

Tutkimuksen alussa mitoitetaan ja mallinnetaan yksi energiakaivokenttä, joka toimii perusratkaisun energiakaivokenttänä. Tämän pohjalta voidaan aloittaa maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmän vuosittaisen ostoenergiankulutuksen ja investointikustannuksien optimointi. Perusratkaisun maaperälaskennan lähtötiedot on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. *Maaperälaskennan lähtötiedot.* (IDA Indoor Climate and Energy, 2012) (Rototec Consulting Ab, Björn Thelin, 2013)

Maaperälaskennan lähtötiedot		yksikkö
Täyteaineen lämmönjohtavuus (vesi)	0,6	W/mK
Täyteaineen ominaislämpökapasiteetti	4180	J/kgK
Täyteaineen tiheys	1000	kg/m ³
Lämmönsiirtoputkien lämmönjohtavuus	0,42	W/mK
Lämmönsiirtoputkien ominaislämpökapasiteetti	2200	J/kgK
Lämmönsiirtoputkien karheus	$5,0 \cdot 10^{-6}$	m
Lämmönsiirtonesteen jäätymispiste (vesi-etanoli)	-15	°C
Lämmönsiirtonesteen lämmönjohtavuus	0,42	W/mK
Energiakaivojen määrä (muodossa 3 x 4) -1 kaivo	11	kpl
Energiakaivojen syvyys	300	m
U-putkien määrä energiakaivossa	1	kpl
Energiakaivon säde	0,0575	m
Pintamaan paksuus	2	m
U-putkien sisäsäde	0,016	m
U-putkien materiaalin paksuus	0,0026	m
Pintamaan lämmönjohtavuus	0,1	W/mK
Pintamaan ominaislämpökapasiteetti	4180	J/kgK
Pintamaan tiheys	1000	kg/m ³
Kallion lämmönjohtavuus	3,55	W/mK
Kallion ominaislämpökapasiteetti	840	J/kgK
Kallion tiheys	2880	kg/m ³
Energiakaivon keskilämpötila	8,85	°C
Energiakaivon lämpövastus	0,14	Km/W
Lämmönsiirtonesteen massavirta	8,5	kg/s

Perusratkaisun energiakaivojen syvyydeksi määritetään 300 m, mutta energiakaivojen syvyys on yksi optimoitavista muuttujista, jotka voivat muuttua energiakaivojen syvyyttä optimoidessa. Energiakaivojen määräksi asetetaan perusratkaisussa 11 energiakaivoa, jotka asetetaan 3 x 4 muotoon vähennettynä yhdellä kaivolla. Energiakaivojen etäisyys toisistaan x- ja y-akselin suuntaan on vähintään 20 metriä. Energiakaivon säde, pinta-

maan paksuus, U-putkien määrä energiakaivossa, U-putkien sisäsäde ja U-putkien materiaalin paksuus määritellään IDA-ICE -ohjelmiston oletuksen mukaan. (IDA Indoor Climate and Energy, 2012)

Mitoitusta jatketaan syöttämällä maaperän, energiakaivon, U-putkien ja lämmönsiirtonesteen ominaisuudet. Pintamaan ja kallion ominaisuudet asetetaan IDA-ICE -ohjelmiston oletuksen mukaan pois lukien kallion lämmönjohtavuus, joka saadaan TRT-testistä. Edellä mainittujen ominaisuuksien lisäksi asetetaan vielä maaperän keskilämpötila, joka saadaan myös TRT-mittauksesta. (Rototec Consulting Ab, Björn Thelin, 2013)

Maaperän ominaisuuksien syöttämisen jälkeen lähtötietoihin syötetään myös energiakaivon täyteaineen lämmönjohtavuus, lämmönsiirtoputkien materiaalien lämmönjohtavuus sekä maapiirin lämmönsiirtonesteen lämmönjohtavuus. Täyteaineen ja lämmönsiirtoputkien ominaisuudet ovat IDA-ICE -ohjelmiston oletuksia. Maapiirin lämmönsiirtonesteeksi asetetaan Suomessa yleisesti käytetty vesi-etanoliliuos, jonka etanolipitoisuus on noin 20 %. Etanolia toimii liuoksen jäätymisenestoaineena. Vesi-etanoliliuoksen jäätymispiste on -15 °C, joka kuitenkin voi hieman vaihdella riippuen etanolipitoisuudesta. Joka tapauksessa tämän lämpötilan ei pitäisi missään tilanteessa tulla raja-arvona vastaan, koska maapiirin lämmönsiirtonesteen absoluuttinen lämpötila ei saa laskea alle -5 °C. Jos näin kuitenkin tapahtuu, tulee energiakaivokenttä jäätymään eikä kentästä saada yhtä suurella teholla lämpöä, koska lämpövirta energiakaivossa pienenee pohjaveden jäädyttyä.

Lopuksi ennen kuin energialaskenta voidaan annetuilla lähtötiedoilla aloittaa, pitää vielä asettaa joko TRT-mittauksen tuloksista laskettu energiakaivon lämmönvastus tai syöttää käytetyt energiakaivon sisäiset lämmönvastukset. Tässä tapauksessa syötetään TRT-mittauksesta saatu energiakaivon lämmönvastus. Lisäksi syötetään vielä lämmönsiirtonesteen massavirta, joka jakaantuu tasan energiakaivojen kesken. (IDA Indoor Climate and Energy, 2012) (Rototec Consulting Ab, Björn Thelin, 2013)

6.2 Energiakaivojen mallintaminen IDA-ICE:lla

Energiakaivojen mitoitus suoritetaan energiasimuloinnin yhteydessä. Energiasimuloinnissa otetaan huomioon energiakaivoista lämpöpumpun avulla saatu lämmitys- ja jääh-

dytysenergia. Energiasimuloinnin tuloksissa on eroteltuna, kuinka paljon on simuloinnissa hyödynnetty maan energiaa lämmitykseen ja jäähdytykseen. Lisäksi samassa taulukossa näkyvät muut ilmaisenergiat, kuten lämmöntalteenottojen hyödyntämät energiat. Simuloinnissa hyödynnettyjen omavaraisenergioiden määrä kilowattitunteina on esitetty taulukossa 10 eroteltuna kuukausittain. Lisäksi tuloksissa on taulukoituna järjestelmittain, kuinka suuri on kunkin järjestelmän energiatarve. Nämä on taulukoitu kappaleessa 6.3, jossa esitetään simuloidun maalämpö- ja jäähdytysjärjestelmän ostoenergian kulutus. Taulukoiden avulla voidaan verrata, kuinka suuren osan järjestelmät hyödyntävät omavaraisenergiaa. Loppu energiatarve tuotetaan ostoenergialla. Tämän tutkimuksen kohderakennuksessa lisäenergia tuotetaan suoralla sähköenergialla.

Taulukko 10. Omavaraisenergian käyttö perusratkaisussa.

Talteenotettu ja omavaraisenergia

kWh (tuntuva ja sidottu)									
Kuukausi	LTO	Ilmanvaihdossa jäähdytyksen talteenotto	Lämmöntalteenotto, primäärijärjestelmä	Jäähdytyksen talteenotto, primäärijärjestelmä	Aurinkolämpö	Maalämpö	Maajäähdytys	Ulkoilma lämpö	Ulkoilma jäähdytys
1	46581.0	0.0				25397.0	0.0		
2	42059.0	0.0				21615.0	0.0		
3	44835.0	0.0				21399.0	0.0		
4	29897.0	-0.0				13752.0	-0.7		
5	16614.0	-1.7				8877.0	-453.1		
6	7566.0	-0.0				7092.0	-1464.0		
7	2558.0	-27.4				4742.0	-5149.0		
8	5048.0	-65.5				5724.0	-5814.0		
9	15849.0	-0.0				9414.0	-50.5		
10	27291.0	0.0				15124.0	0.0		
11	37421.0	0.0				20522.0	0.0		
12	44207.0	0.0				24502.0	0.0		
Yhteensä	319926.0	-94.6				178160.0	-12931.3		

Energiakaivojen mitoituksen kannalta tärkein tieto on esitetty kuitenkin simuloinnin tuloksissa väliotsikoilla päälämmitys, lisälämmitys ja maalämmönsiirrin. Lämpöpumpun tuloksista pitää simuloinnin jälkeen tarkistaa kuukausittaiset lämpöpumpun lämpökertoimen arvot sekä lämmönsiirtonesteen lämpötilat. Jos lämpökertoimen arvot ovat liian alhaiset, pitää muuttaa energiakaivokentän kaivojen määrä tai pienentää lämpöpumpun mitoitusastetta. Vastaavasti, jos lämmönsiirtonesteen lämpötilat laskevat liian alhaisiksi, pitää nostaa lämmönsiirtonesteen virtausnopeutta, jotta lämmönsiirtoneste ei ehdi jäähtyä lauhduttimessa liiaksi. Lisälämmityksestä ei tarvitse muuten välittää, mutta sen tulisi olla mahdollisimman vähän käytössä, jotta ostoenergiankulutus olisi mahdollisimman alhainen. Maalämmönsiirtimen tuloksista pitää erityisesti ottaa huomioon lämpöpumpun tapaan lämmönsiirtonesteen lämpötila kuukausittain. Maapiirin lämmönsiirtonesteen keskilämpötila ei saa laskea pitkäksi aikaa alle 0 °C. Lisäksi lämmönsiirtonesteen lämpötila ei saa laskea missään ajankohdassa alle -5 °C. Taulukossa 11 on esitetty lämpöpumpun lämpökertoimet sekä tulevan ja poistuvan lämmönsiirtonesteen lämpötilat. Taulukossa 12 on puolestaan esitetty maalämmönsiirtimen poistuvan lämmönsiir-

tonesteen lämpötila, massavirta sekä lämmönsiirtimen keräämä lämpöenergia watteina.
(IDA Indoor Climate and Energy, 2012)

Taulukko 11. *Perusratkaisun lämpöpumpun lämpökertoimet sekä tulevan ja poistuvan lämmönsiirtonesteen lämpötilat.*

Lämpöpumppu	COP	Tulevan lämmönsiirtonesteen lämpötila (°C)	Poistuvan lämmönsiirtonesteen lämpötila (°C)
Tammikuu	2,7	5,3	-16,7
Helmikuu	2,8	5,3	-15,7
Maaliskuu	2,8	5,5	-13,6
Huhtikuu	2,9	6,2	-8,6
Toukokuu	3	7	-5,4
Kesäkuu	3	7,5	-5,6
Heinäkuu	3	8,4	-4,4
Elokuu	2,9	9,1	-3,2
Syyskuu	3	7	-5,5
Lokakuu	2,8	6,4	-8,5
Marraskuu	2,8	5,6	-13,1
Joulukuu	2,7	5	-16,2

Taulukko 12. *Perusratkaisun maalämmönsiirtimen poistuvan lämmönsiirtonesteen lämpötila, massavirta sekä lämmönsiirtimen keräämä lämpöenergia watteina.*

Maalämmönsiirrin	Massavirta (kg/s)	Kerätty lämpöenergia (W)	Poistuvan lämmönsiirtonesteen lämpötila (°C)
Tammikuu	0,9	34134,8	5,3
Helmikuu	0,9	32164,5	5,3
Maaliskuu	0,9	28786,3	5,5
Huhtikuu	0,7	19061,7	6,4
Toukokuu	0,6	11367,3	7,2
Kesäkuu	0,6	7788,7	7,5
Heinäkuu	0,6	-510,4	8,3
Elokuu	0,6	-135	8,5
Syyskuu	0,6	12959,2	7,2
Lokakuu	0,8	20345,1	6,5
Marraskuu	0,9	28501,4	5,6
Joulukuu	0,9	32931,8	5









Taulukosta 11 nähdään, että lämpöpumpun lämpökertoimet ovat hieman alemmat kuin mitä on suunniteltu eli vähintään 3,5. Tulevan ja poistuvan lämmönsiirtonesteen lämpötilat ovat raja-arvojen mukaisia. Taulukosta 12 vastaavasti nähdään, että maalämmönsiirtimen poistuvan lämmönsiirtonesteen lämpötila ei vuoden aikana laske liian alhaiseksi, sillä alimmillaan lämmönsiirtonesteen lämpötila on 5 °C. Maalämmönsiirtimen lämpötilat kuitenkin laskevat vuosittain, sillä maaperä viilenee hiljalleen, kun maaperästä siirretään rakennuksen lämmitysjärjestelmään lämpöenergiaa. Tästä syystä olisi hyvä tutkia maalämmönsiirtimen poistuvan lämmönsiirtonesteen lämpötiloja vähintään viiden vuoden ajan, jotta selvitetään se, ettei maaperä jäädy. Maaperän viilentymistä ja jäätymistä hidastaa kuitenkin tutkittavaan järjestelmään asennettu jäähdytys, joka kesäaikana palauttaa lämpöenergiaa maaperään.

6.3 Mallinnetun energiakaivokentän ja maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmän aiheuttama vuositason ostoenergian kulutus

Energiasimuloinnin tuloksissa esitetty ostoenergiankulutus aiheutuu kokonaan kohderakennuksen maalämpö- ja -jäähdytyspumpun sähköenergiankulutuksesta, tarvittavan lisälämmön lämminvesivaraajaan tuottavan lisälämmittimen sähkökulutuksesta sekä lämmitykseen ja jäähdytykseen osallistuvien laitteiden laitesähköstä. Näiden lisäksi ostoenergiaa käytetään kuluttajien valaistukseen sekä laitesähköön. Näiden kaikkien tekijöiden summana saadaan taulukossa 13 esitetty rakennuksen ostoenergian kulutus. Jos halutaan erotella, mistä järjestelmistä energiankulutus aiheutuu, on järjestelmien aiheuttamat energiankulutukset esitetty taulukossa 14.






Taulukko 13. Perusratkaisun ostoenergiankulutus.

Ostoenergiankulutusraportti

		Ostoenergiankulutus		Tarve	Kokonaisenergia	
		kWh	kWh/m ²	kW	kWh	kWh/m ²
	Valaistus, kiinteistö	15635	2.4	1.79	26579	4.1
	Laitteet, kiinteistö	34107	5.2	3.89	57982	8.9
	Jäähdytys	3930	0.6	39.63	6681	1.0
	LVI sähkö	74325	11.4	8.81	126352	19.3
	Sähkölämmitys, kiinteistö	192776	29.4	128.0	327719	50.0
	Yhteensä, Kiinteistösähkö	320773	49.0		545313	83.3
	Yhteensä	320773	49.0		545313	83.3
	Valaistus, asukas	43129	6.6	4.92	73319	11.2
	Laitteet, asukas	94099	14.4	10.74	159968	24.4
	Yhteensä, Asukkaan sähkö	137228	20.9		233287	35.6
	CHP tuotto	0	0.0	0.0	0	0.0
	Yhteensä, Tuotettu sähkö	0	0.0		0	0.0
	Yhteensä	458001	69.9		778600	118.9

Taulukko 14. Perusratkaisun järjestelmien aiheuttamat energiankulutukset.

Energiankulutus**kWh (tuntuva ja sidottu)**

Kuukausi	Tilalämmitys	Tilajäähdytys	Lämmitys IV-koneella	Jäähdytys IV-koneella	Lämmin käyttövesi
					
1	29440.0	0.0	12916.0	0.0	19622.0
2	24760.0	0.0	13103.0	0.0	17706.0
3	20416.0	0.0	10520.0	0.0	19627.0
4	7708.0	0.0	3400.0	136.7	19056.0
5	493.3	0.0	123.8	1120.0	19794.0
6	264.5	0.0	9.8	3137.0	19155.0
7	143.9	0.0	0.0	8668.0	19780.0
8	142.7	0.0	0.0	8076.0	19805.0
9	1110.0	0.0	266.7	387.1	19146.0
10	10814.0	0.0	1916.0	0.0	19720.0
11	21164.0	0.0	7277.0	0.0	19029.0
12	26654.0	0.0	9997.0	0.0	19674.0
Yhteensä	143110.4	0.0	59529.3	21524.8	232114.0

Taulukosta 14 nähdään, että suurimman energiankulutuksen aiheuttaa tilalämmitys ja lämpimän käyttöveden tuottaminen. Näiden lisäksi myös ilman lämmittäminen ja jäähdyttäminen IV-koneella kuluttavat vain hieman energiaa. Laskemalla yhteen eri järjestelmien energiantarpeet, saadaan kokonaisenergian kulutukseksi 456 MWh. Jos saatua kokonaisenergiankulutusta vertaa taulukon 10 maalämmöstä hyödyksi saatavaan oma-varaisenergiaan, saadaan ostoenergian kulutukseksi 321 MWh. Tämän lisäksi ostoenergiaa kuluttavat jo asukkaiden valaistus ja kuluttajalaitesähkö. Kuitenkin osa asukkaan valaistuksen sähkökulutuksesta ja kuluttajalaitesähköstä voidaan hyödyntää lämpöenergiana tilalämmitykseen. Näin tilojen lämmitystarve vähenee.








Kun perusratkaisun ostoenergiankulutus on simuloitu ja maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmään energiakaivokenttä mitoitettu, voidaan siirtyä optimoimaan maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmän vuotuista ostoenergiankultusta ja investointikustannuksia. Maalämpöjärjestelmän optimoinnista kerrotaan kappaleessa 7.

6.4 Kaukolämpöjärjestelmän aiheuttama vuositasen ostoenergian kulutus

Tutkimuksessa verrataan maalämpöjärjestelmän kannattavuutta kaukolämpöjärjestelmään, joten kohderakennuksen energiakulutus simuloitiin myös kaukolämpöjärjestelmällä. Simuloidun ostoenergiankulutuksen avulla voidaan laskea kaukolämpöjärjestelmän kustannusten nykyarvo, jota voidaan verrata maalämpöjärjestelmän vastaavaan nykyarvoon. Kaukolämmön ostoenergiankulutus tutkimuksen kohteen rakennuksissa on esitetty taulukossa 15.

Taulukko 15. *Kaukolämmön ostoenergiankulutus.*

Ostoenergiankulutusraportti

		Ostoenergiankulutus		Tarve	Kokonaisenergia	
		kWh	kWh/m ²	kW	kWh	kWh/m ²
	Valaistus, kiinteistö	15640	2.4	1.79	26588	4.1
	Laitteet, kiinteistö	33437	5.1	3.82	56843	8.7
	LVI sähkö	73312	11.3	8.7	124630	19.1
	Yhteensä, Kiinteistösähkö	122389	18.8		208061	31.9
	Lämmitys, kaukolämpö	198065	30.4	148.9	138645	21.3
	LKV, kaukolämpö	243844	37.4	27.84	170691	26.2
	Kaukojäähdytys	21461	3.3	89.93	8585	1.3
	Yhteensä, Kiinteistökaukolämpö	463370	71.1		317921	48.8
	Yhteensä	585759	89.9		525982	80.7
	Valaistus, asukas	47144	7.2	5.38	80145	12.3
	Laitteet, asukas	103553	15.9	11.82	176040	27.0
	Yhteensä, Asukkaan sähkö	150697	23.1		256185	39.3
	Yhteensä	736456	113.0		782167	120.0

Kaukolämmön kokonaisenergian kulutus lämmitettyä nettoalaa kohden on samaa tasoa kuin maalämpöjärjestelmässä. Kokonaisenergiankulutus kaukolämpöjärjestelmässä on kuitenkin huomattavasti suurempi kuin perusratkaisun kokonaisenergiankulutus, sillä kaukolämmön tuotantomuodoille asetettu muotokerroin on 0,7. Sähkölle vastaava tuotantomuotokerroin on 1,7.

7 Maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmän tarvitseman vuositason ostotoenergian ja investointikustannuksien optimointi

Tässä tutkimuksessa etsittävän parhaan mahdollisen maalämpö- ja jäähdytysjärjestelmän löytämiseksi optimoidaan vuositason ostotoenergia sekä maalämpö- ja jäähdytysjärjestelmän investointikustannukset. Perusratkaisun maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmän vuositason ostotoenergia saatiin simuloimalla IDA-ICE -ohjelmistolla kohderakennuksien vuoden ajan energiankulutus. Vastaavasti investointikustannukset erikokoisille maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmille on esitetty kappaleessa 5.2. Optimoimalla maalämpö- ja jäähdytysjärjestelmän vuositason ostotoenergia ja investointikustannukset mahdollisimman pieniksi löydetään optimaalinen maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmäratkaisu kohderakennuksiin. Päätösmuuttujia ovat maalämpöpumpun teho, energiakaivojen syvyys, lämmönkeruunesteen massavirta sekä osittain energiakaivojen lukumäärä. Energiakaivojen mahtuminen tontille pyritään tutkimaan erillisen asemakuvan mukaan, kun on selvitetty optimoidun järjestelmäratkaisun tekniset tiedot. Jos energiakaivot eivät mahdu tontille, asetetaan optimointiin energiakaivojen maksimäärälle rajoitus.

Optimoinnissa täytyy huomioida, että optimoitu järjestelmä on varmasti teknisesti toimiva, eivätkä mitkään järjestelmän arvot ole sallittujen raja-arvojen ulkopuolella. Jos näin kuitenkin käy, pitää optimointiin asettaa lisää rajoitteita, jotta optimointityökalu etsii vain toimivia järjestelmäratkaisuja. Yhdeksi ongelmakohtaksi maalämpö- ja jäähdytysjärjestelmän optimoinnissa saattaa nousta lämmönsiirtonesteiden liiallinen jäähtyminen, mikä voi aiheuttaa lämmönsiirtonesteen tai maaperän jäähtymistä. Liiallista lämmönsiirtonesteen jäähtymistä voidaan kuitenkin pyrkiä säättämään esimerkiksi maapiirin lämmönsiirtonesteen virtausnopeutta lisäämällä (EQUA Simulation AB, 2012).

7.1 Optimointimenetelmä ja -työkalu

Optimoinnin työkaluna käytetään Aalto Yliopiston kehittämää Java-alustaan perustuvaa MOBO-ohjelmistoa, joka voidaan liittää IDA-ICE -ohjelmiston kanssa toimimaan yhdessä. Optimointiohjelma yksinkertaisuudessaan perustuu siihen, että MOBO vaihtelee optimoinnissa päätösmuuttujia IDA-ICE -ohjelmistoon, jonka jälkeen IDA-ICE simuloi määritetyn simuloinnin ja palauttaa simuloinnin tulokset MOBO:on. Tämän jälkeen MOBO arvioi simuloinnin tuloksien mukaan, mihin suuntaan päätösmuuttujia muutetaan, ja käynnistää uuden energiasimulaation. Simulointikierrroksia MOBO tekee sen

mukaan, mikä algoritmi optimointiin on valittu, ja mitkä asetukset optimointikierroksille asetetaan. (EQUA Simulation AB, Erkki Karjalainen, 2014) (Aalto Yliopisto, 2013) (Aalto Yliopisto, 2013)

IDA-ICE liitetään toimimaan MOBO:n kanssa yhdessä muutamilla luoduilla tiedostoilla, jotka sisältävät komentorivejä. Näiden komentorivien avulla MOBO avaa simuloitavan IDA-ICE -mallin ja antaa suorituskäskyjä IDA-ICE:lle. MOBO käyttää kaikkia mahdollisia tietokoneen threadeja, joten MOBO voi pyörittää yhtä aikaa useampia IDA-ICE -simulointeja, mikä huomattavasti nopeuttaa optimointiin kuluva kokonaisaikaa.

Ennen optimoinnin aloittamista MOBO:on pitää myös määrittää optimoinnin päätösmuuttujat, kohdefunktiot sekä muutamat tiedostot, joiden avulla optimointi toimii. Päätösmuuttujat voivat olla joko jatkuvia, diskreettejä tai funktioita. MOBO:on määritettäviä tiedostoja ovat muun muassa IDA-ICE:n tulos- ja "script"-tiedostot. Lisäksi MOBO:on määritetään myös IDA-ICE:n "script"-tiedostosta muokattu "script_temp"-tiedosto, johon lisätään muutettavien parametrien kohdille tietyt "delimiterit", jotka on määritelty päätösmuuttujien ominaisuuksiin. Näin MOBO ja IDA-ICE tunnistavat, mitä päätösmuuttujia muuttamalla kohdefunktioita optimoidaan. Kohdefunktiot voivat olla esimerkiksi "min"-funktioita, eli MOBO pyrkii minimoimaan jonkin funktion arvoa. Optimointiin MOBO:sta löytyy valmiita algoritmeja, joiden avulla MOBO suorittaa optimoinnin. Algoritmien valinnan jälkeen pitää vielä määrittää, kuinka monella optimointikierroksella optimointi tehdään.

7.2 Optimointi

Tutkimuksessa optimointiongelmaksi on käytännössä minimoida maalämpöjärjestelmän elinkaarikustannukset, jotka aiheutuvat järjestelmän investointikustannuksista, vuosittaisista ostoenergian kustannuksista ja huolto- ja korjauskustannuksista. Formaalisti optimointiongelma määritellään seuraavasti:

$$\text{Min}\{F_1(x) = K_{\text{elinkaari}}\}, \quad (7.1)$$

jossa $K_{\text{elinkaari}}$ on maalämpöjärjestelmän elinkaarikustannukset määritetyllä ajanjaksolla. Tässä tutkimuksessa optimointi laaditaan kuitenkin monitavoiteoptimoinnilla, jossa kohdefunktioita ovat maalämpöjärjestelmän investointikustannukset ja vuosittaiset os-

toenergian kustannukset. Monitavoiteoptimoinnissa kohdefunktioita pyritään minimoimaan. Formaalisti tämä optimointiongelma määritellään min-funktiona (Siren, 2012) seuraavasti

$$\text{Min} \{ F_2(x) = K_{\text{osto}}, F_3(x) = I_{\text{tot}} \}, \quad (7.2)$$

siten että rajoitteena on

$$H_1(x) = T_f \geq -5^\circ\text{C}, \quad (7.3)$$

joissa K_{osto} on vuosittaisen ostoenergian kustannukset, I_{tot} maalämpöjärjestelmän investointikustannukset ja T_f on lämmönsiirtonesteen keskilämpötila. Rajoitefunktio (7.3) määrittää, ettei lämmönsiirtonesteen keskilämpötila saa mennä millään hetkellä alle -5°C . Optimoinnin päätösmuuttujia ovat maalämpöpumpun teho ja energiakaivojen syvyys ja lämmönkeruunesteen massavirta. Päätösmuuttujat on määritelty alla olevassa yhtälössä (7.4):

$$x = (x_1, x_2, x_3)^T, \quad (7.4)$$

jossa x_1 on maalämpöpumpun teho, x_2 energiakaivon syvyys ja x_3 lämmönkeruunesteen massavirta.

Huolto- ja korjauskustannukset otetaan huomioon vasta järjestelmän investointikustannuksiin ja vuosittaisiin ostoenergian kustannuksiin kohdistuvan optimoinnin jälkeen. Tämä tarkoittaa sitä, että monitavoiteoptimoinnin jälkeen monitavoiteoptimoinnista saadusta Pareto-optimaalisesta ratkaisujoukosta määritetään elinkaarikustannuksiltaan paras järjestelmä, jota kutsutaan elinkaarikustannuksiltaan optimaaliseksi järjestelmäksi.

Monitavoiteoptimoinnin neljäntenä päätösmuuttujana oli tarkoitus alustavasti olla energiakaivojen lukumäärä, mutta MOBO:n ja IDA-ICE:n yhteistoiminnan esteestä johtuen tämä oli jätettävä optimoinnista pois. MOBO ei pystynyt määrittelemään uusille energiakaivoille koordinaatteja, jotka IDA-ICE kuitenkin vaatii aina jokaiselle energiakaivolle. Energiakaivokentän koordinaatit ovat energiakaivokentän toiminnan mallintamisen kannalta merkittävässä roolissa. Näin ollen energiakaivojen lukumäärä pyritään op-

timoimaan vain manuaalisesti tekemällä energiasimulointi uudestaan muutamalla eri energiakaivojen lukumäärällä ja vertaamalla simuloinnin tuloksia toisiinsa. Laskemalla näistä energiankaivojen lukumäärän vaikutus järjestelmän investointikustannuksiin ja rakennuksien ostoenergian tarpeeseen, voidaan varmistua optimaalisesta maalämpöjärjestelmästä.

Jälkeenpäin manuaalisesti suoritettava energiakaivojen lukumäärän optimointi aiheuttaa lopullisiin tuloksiin hieman suuremman virheen kuin mitä olisi aiheutunut, jos energiakaivojen lukumäärä olisi voitu optimoida MOBO:lla. Energiakaivojen lukumäärä on kuitenkin keskeisessä roolissa optimoitaessa maalämpöjärjestelmää, joten on parempi pyrkiä optimoimaan kaivojen lukumäärä manuaalisesti kuin jättää kokonaan huomioimatta kaivojen lukumäärän vaikutus.

MOBO:on syötettävät päätösmuuttujat määritellään seuraavasti. Energiakaivojen syvyys määritetään jatkuvaksi muuttujaksi, jonka vaihteluväli on 50 metristä 300 metriin. Lämmönkeruunesteen massavirta määritetään myös jatkuvaksi muuttujaksi, jonka vaihtelu väli on 3 – 15 kg/s. Maalämpöpumpun teho puolestaan määritetään diskreetiksi muuttujaksi, jonka arvoja ovat 140 kW, 120 kW, 100 kW, 80 kW, 70 kW, 60 kW ja 40 kW. Minivoitaviksi funktioiksi määritellään investointikustannukset ja ostoenergiankulutusta vastaava energianhinta. Algoritmiksi valitaan NSGA-II, jonka "populaatioksi" määritetään 4 ja "generaatioksi" 40. "Mutation probability":n arvoksi asetetaan 0,05 ja "Crossover probability":n arvoksi 0,9.

NSGA on Pareto-perusteinen algoritmi, joka lajittelee ratkaisut dominanssin perusteella. Ensin algoritmi kerää dominoitumattomat ratkaisut dominanssirintamaan ja antaa niille fitness-arvot rintamansa mukaan ja poistaa nämä ratkaisut populaatiosta. Tämän jälkeen algoritmi kerää uudet dominoitumattomat ratkaisut toiseen ryhmään ja antaa niille fitness-arvot. Fitness-arvojen antamisen jälkeen algoritmi poistaa kyseiset ratkaisut populaatiosta. Seuraavaan generaatioon valitaan vanhemmat satunnaisesti, mutta niin että parhaiden ryhmien ratkaisut pääsevät lisääntymään todennäköisemmin. Algoritmin tehokkuus perustuu siihen, että valinta tapahtuu lajittelussa saadun fitness-arvon mukaan, eikä jokaista monitavoitteisen osafunktion arvoa tarvitse laskea erikseen. Pareto-perusteisten algoritmien heikkous on usein siinä, että ratkaisujoukon keskinäisten dominanssisuhteiden laskeminen on raskasta. (Perkola, 2014)

NSGA-II algoritmi on NSGA algoritmista kehittyneempi versio, jossa on tehokkaampi menetelmä ratkaisujen lajitteluun dominanssisuhteiden mukaan (Perkola, 2014). Lisäksi NSGA-II algoritmista on menetelmiä, joilla pyritään säilyttämään ratkaisujen monimuotoisuutta (Perkola, 2014). NSGA-II valittiin simuloinnin algoritmiksi, koska sen on todettu etsivän parhaat Pareto-optimaaliset ratkaisut (Deb, et al., 2002). Kalyanmoy Deb tutkijaryhmänsä kanssa vertaili omissa tutkimuksissaan NSGA-II, PAES ja SPEA algoritmeja, ja sai tulokseksi, että NSGA-II antoi parhaat Pareto-optimaaliset ratkaisut kaikissa ryhmän tekemissä yhdeksässä optimointiongelmassa (Deb, et al., 2002).

8 Optimoinnin tulokset ja arvio maalämpö- ja - jäähdytysjärjestelmän kannattavuudesta uudiskerrostaloraken- nuksissa

Monitavoiteoptimoinnissa määritettiin populaatioksi 4 ja generaatioksi 40, jotka eivät välttämättä ole optimaalinen asetus, koska optimaalisen ratkaisun löytämiseksi saatetaan joskus joutua ajamaan satoja optimointikierroksia. Tämä kohtuullisen pieni optimointikierrosten lukumäärä oli välttämätön, koska tutkimuskohteen yhden vuoden energiasimulointi rakennuksiin kestää itsessään jo kuudesta kahdeksaan tuntiin. Tässä tapauksessa ei optimointikierrosten lukumäärällä kuitenkaan vaikuttaisi olevan liian suurta vaikutusta, sillä NSGA-II algoritmi löysi hyvin optimaalisen ratkaisun maalämpöjärjestelmälle.

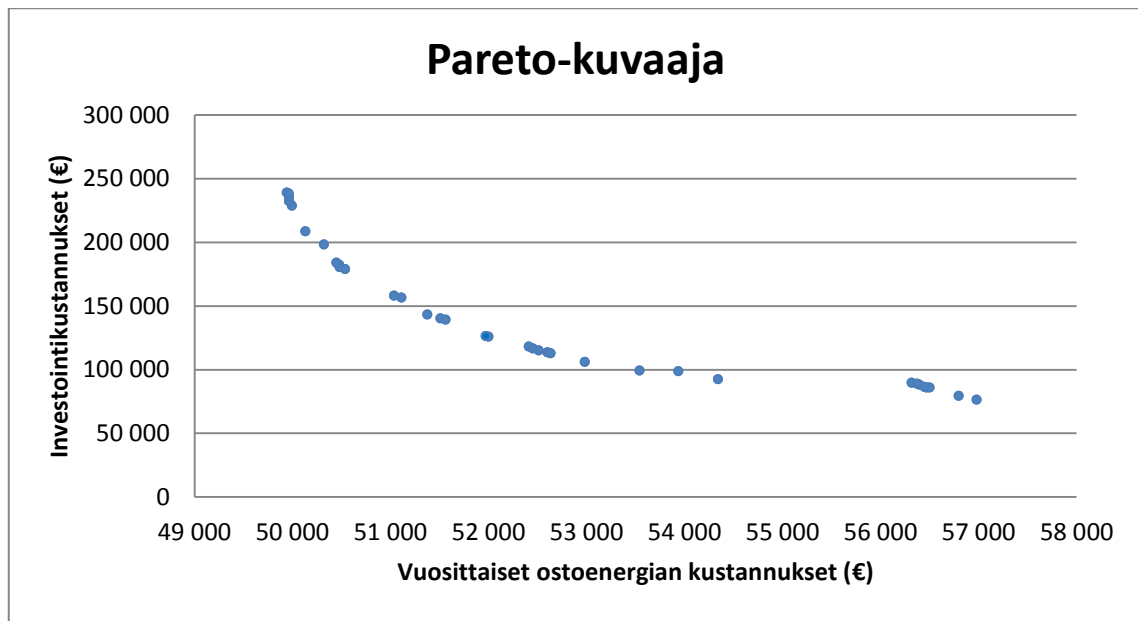
Seuraavan alaotsikon alla käsitellään optimoinnista saatuja tuloksia, jotka perustuvat sekä optimoinnista saatuun parhaaseen ratkaisuun että jo aiemmin tehtyyn kaukolämmön energiasimulointiin. Näiden kahden investointikustannuksista ja ostoenergian kustannuksista laskettuja nettonykyarvoja ja takaisinmaksuaikoja vertaillaan ja tehdään selvitys, kuinka kannattava maalämpöjärjestelmä asuinkerrostaloon on verrattuna kaukolämpöön tai esimerkiksi sähkölämmitykseen. Lisäksi vielä selvitetään manuaalisesti simuloimalla, vaikuttaisiko energiakaivojen lukumäärän muutos järjestelmän kustannuksien nykyarvoon pienentävästi.

8.1 Optimoinnin tulokset

Monitavoiteoptimoinnista tuloksena saatiin Pareto-optimaalisten ratkaisujen joukko, joka on esitetty taulukossa 16. Parhaiten monitavoiteoptimoinnin investointienkustannuksien ja vuosittaisten ostoenergian kustannuksien suhdetta kuvaa Pareto-kuvaaja, jossa on esitetty monitavoiteoptimoinnista saatu Pareto-optimaalinen ratkaisujoukko. Pareto-kuvaaja on esitetty tämän tutkimuselostuksen kuvana 23. Pareto-kuvaajassa y-akselilla on investointikustannukset ja x-akselilla vuosittaiset ostoenergian kustannukset.

Taulukko 16. Optimoinnin tulokset. Keltaisella on merkitty optimaalisin ratkaisu.

Investointikustannukset (€)	Vuosittaiset ostoenergian kustannukset (€)	Energiakaivon syvyys (m)	lämmönsiirtonesteen massavirta (kg/s)	Lämpöpumpun teho (kW)
208 627	50 134	225,2	5,7	140
113 572	52 603	100,1	12,2	80
86 045	56 470	98,1	10,6	40
112 712	52 636	98,1	12,2	80
140 240	51 511	100,1	12,2	120
99 164	53 545	82,5	10,6	70
182 283	50 478	165,3	4,0	140
114 970	52 514	103,3	4,8	80
139 272	51 566	97,9	4,4	120
125 938	52 002	97,9	4,1	100
126 476	51 972	99,1	3,7	100
85 937	56 503	97,9	3,7	40
88 088	56 397	102,8	3,7	40
98 841	53 939	96,9	3,7	60
228 735	49 995	270,9	3,6	140
79 486	56 800	83,2	4,1	40
92 390	54 343	52,0	4,1	80
198 197	50 324	231,8	4,0	120
118 196	52 412	110,6	4,0	80
116 476	52 457	106,7	4,0	80
180 562	50 482	161,4	4,8	140
106 153	52 984	83,2	4,9	80
156 476	51 112	106,7	4,0	140
158 197	51 038	110,6	4,8	140
89 808	56 321	106,7	8,2	40
239 057	49 943	294,4	4,0	140
143 143	51 378	106,7	4,0	120
86 368	56 452	98,9	10,7	40
232 175	49 967	278,7	4,0	140
184 003	50 449	169,3	4,1	140
235 616	49 965	286,6	4,0	140
238 197	49 964	292,4	4,0	140
88 948	56 375	104,7	4,1	40
76 475	56 984	76,4	4,1	40
178 842	50 539	157,5	10,6	140
208 627	50 134	225,2	5,7	140
113 572	52 603	100,1	12,2	80
86 045	56 470	98,1	10,6	40
112 712	52 636	98,1	12,2	80
140 240	51 511	100,1	12,2	120
99 164	53 545	82,5	10,6	70
182 283	50 478	165,3	4,0	140
114 970	52 514	103,3	4,8	80
139 272	51 566	97,9	4,4	120
125 938	52 002	97,9	4,1	100
126 476	51 972	99,1	3,7	100
85 937	56 503	97,9	3,7	40
88 088	56 397	102,8	3,7	40
98 841	53 939	96,9	3,7	60
228 735	49 995	270,9	3,6	140
79 486	56 800	83,2	4,1	40
92 390	54 343	52,0	4,1	80
198 197	50 324	231,8	4,0	120
118 196	52 412	110,6	4,0	80
116 476	52 457	106,7	4,0	80
180 562	50 482	161,4	4,8	140
106 153	52 984	83,2	4,9	80
156 476	51 112	106,7	4,0	140
158 197	51 038	110,6	4,8	140
89 808	56 321	106,7	8,2	40
239 057	49 943	294,4	4,0	140
143 143	51 378	106,7	4,0	120
86 368	56 452	98,9	10,7	40
232 175	49 967	278,7	4,0	140
184 003	50 449	169,3	4,1	140
235 616	49 965	286,6	4,0	140
238 197	49 964	292,4	4,0	140
88 948	56 375	104,7	4,1	40
76 475	56 984	76,4	4,1	140
178 842	50 539	157,5	10,6	140



Kuva 23. Pareto-kuvaaja, jossa on esitetty optimoinnin tuloksena saatu Pareto-optimaalisten ratkaisujen joukko.

Lopullisessa optimoinnissa elinkaarikustannuksiltaan optimaaliseksi maalämpöjärjestelmäksi 30 vuoden tarkastelujaksolla saatiin järjestelmä, jonka lämpöpumpun teho on 100 kW, energiakaivojen syvyys 99,1 m ja lämmönsiirtonesteen massavirta 3,65 kg/s. Optimaalisen järjestelmän investointikustannukset ovat 126 476 € ja vuosittaiset ostoenergian kustannukset 51 972 €. Kaikki optimaalisen järjestelmän tekniset tiedot sekä investoinnin ja ostoenergian kustannukset löytyvät keltaiselta pohjalta taulukosta 16, jossa on taulukoituna kaikki monitavoiteoptimoinnin tulokset. Elinkaarikustannuksiltaan optimaalisen ratkaisun määritykseen vaikuttaa suuresti kuitenkin tarkastelujakson pituus, sillä mitä lyhyempi tarkastelujakso on, sitä enemmän investointikustannukset vaikuttavat kustannuksien nettonykyarvoon. Näin ollen, jos tarkastelujakso on lyhyempi, optimaaliseksi ratkaisuksi saadaan investointikustannuksiltaan edullisempi vaihtoehto eli toisin sanoen pienemmällä teholla ja lyhyemmällä energiakaivolla toimiva lämpöpumppu. Seuraavan alaotsikon alla verrataan 30 vuoden tarkastelujaksolla optimaalisen maalämpöjärjestelmän ja kaukolämmön 10 ja 20 vuoden elinkaarikustannuksien nettonykyarvoja.

Optimaalisen ratkaisun energiasimuloinnin tuloksista varmistettiin, että maalämpöjärjestelmä on teknisesti toimiva, eikä lämmönsiirtonesteiden lämpötilat laske liian alhaisiksi eri lämmönsiirtopeleissä. Maapiirin lämmönsiirtonesteen poistumislämpötilat lämpöpumpulta on esitetty taulukossa 17. Taulukosta nähdään, että lämpötilat laskevat alle nollan Celsius-asteen talviaikaan, jolloin lämmönsiirtotarve on suurimmillaan, mutta eivät laske kuitenkaan alle raja-arvon -5 °C . Kuitenkin, koska lämmönsiirtonesteen

lämpötila laskee jo yhden simulointivuoden aikana alle nollan Celsius-asteen, voi olla pieni riski, että ennen kuin maaperän lämpötila tasaantuu, raja-arvo rikkoutuu. Tämä onkin asia, joka on syytä ottaa kaikissa maalämmön järjestelmävaihtoehdoissa huomioon.

Lisäksi optimaalisen järjestelmän simuloinnin tuloksista saatiin selville, että lämpöpumpun COP-lämpökerroin oli keskiarvoltaan 2,8. Arvo jää siis hieman tavoitteesta joka oli 3,5. Tämä johtuu suurimaksi osaksi siitä, että myös lämmintä käyttövetä tuotettiin lämpöpumpulla, mikä heikentää maalämpöpumpun lämpökerrointa huomattavasti. Lämpökertoimen laskeminen johtuu siitä, kun käyttövesi joudutaan lämmittämään huomattavasti korkeampaan lämpötilaan kuin vesi, joka on tarkoitettu kiertämään esimerkiksi lattialämmityspiirissä. Liitteessä 1 on esitetty taulukot optimaalisen ratkaisun ostoenergiankulutuksesta, maapiiristä hyödyksi saadusta energiasta sekä lämpöenergiasta järjestelmittäin. Ostoenergiankulutuksen taulukosta selviää myös, että sisäolosuhteet pysyvät hyvinä, sillä vain kahdessa prosentissa vuoden tunteista operatiivinen lämpötila nousi yli 27 Celsius-asteen lämpimimmissä tiloissa. Lisäksi tyytymättömyyttä lämpöoloihin esiintyi ainoastaan kuudessa prosentissa vuoden tunteista.

Elinkaarikustannuksiltaan optimaalisen järjestelmän löydyttyä kokeiltiin vielä simuloida maalämpöjärjestelmän vuosittainen ostoenergiankulutus optimaalisella järjestelmällä, jonka energiakaivojen lukumääräksi asetettiin ensin kymmenen ja sitten kaksitoista. Tämä laadittiin siksi, että pystyttiin manuaalisesti varmistamaan, että optimaalinen järjestelmä on yhdentoista energiakaivon järjestelmä MOBO:n ja IDA-ICE:n yhteistoiminnan esteestä huolimatta. Lopputulokseksi saatiin siis, että optimaalinen järjestelmä on yhdentoista kaivon maalämpöjärjestelmä. Tulos olisi kuitenkin vielä luotettavampi, jos energiakaivojen lukumäärä olisi pystytty optimoimaan MOBO:lla.

Taulukko 17. Optimaalisen järjestelmän maalämmönsiirtimeen poistuvan lämmönsiirtonesteen lämpötila kuukausittain.

Maalämmönsiirrin	Poistuvan lämmönsiirtonesteen lämpötila (°C)
Tammikuu	-1,1
Helmikuu	-1,1
Maaliskuu	-0,7
Huhtikuu	1,6
Toukokuu	4,1
Kesäkuu	5,2
Heinäkuu	7,8
Elokuu	8,4
Syyskuu	4,2
Lokakuu	1,9
Marraskuu	-0,5
Joulukuu	-1,9
Keskiarvo	2,4

8.2 Optimoidun maalämpöjärjestelmän takaisinmaksuaika sekä maa- ja kaukolämpöjärjestelmien nykyarvojen vertailu

Optimoidun maalämpöjärjestelmän takaisinmaksuajan laskennassa maalämpöjärjestelmän ja kaukolämpöjärjestelmän investointikustannusten erotus jaetaan vuosittaisella ostoenergian kustannussäästöllä, jota maalämpöjärjestelmällä saadaan verrattuna kaukolämpöjärjestelmään. Kaukolämmön investointikustannuksissa ja ostoenergian kustannuksissa ei ole myöskään otettu huomioon kaukokylmää. Tällöin takaisinmaksuaika on 5,74 vuotta, mikäli maalämpöjärjestelmä pystyy vuosittain hyödyntämään vuosittain maaperästä lämpöenergiaa yhtä paljon kuin ensimmäisenäkin vuonna. Todellisuudessa kuitenkin vähintään ensimmäisinä viitenä vuonna hyödynnettävän lämpöenergian määrä laskee, koska maaperän lämpötila laskee hiljalleen ennen kuin se tasaantuu tietylle tasolle. Näin ollen takaisinmaksuaika saattaa hieman pidentyä. Mikäli kaukolämmön investointikustannuksiin ja ostoenergian kustannuksiin otetaan huomioon kaukokylmän investointikustannus ja ostoenergian kustannus, laskee maalämpöjärjestelmän takaisinmaksuaika merkittävästi. Tällöin takaisinmaksuaika on 3,43 vuotta, joka on lähes kaksi ja puoli vuotta lyhyempi kuin ilman kaukokylmää.

Tarkasteltaessa maalämpöjärjestelmän kustannuksien nettonykyarvoa ja kaukolämmön kustannuksien nettonykyarvoa ilman kaukokylmää, huomataan, että taloyhtiön säästö

kymmenen ensimmäisen vuoden aikana on jo yli 20 000 €, jos taloyhtiöön valitaan lämmitysjärjestelmäksi maalämpö. Kolmenkymmenen vuoden aikana säästö nousee jo yli 100 000 €. Järjestelmien kustannuksien nettonykyarvot on esitetty taulukossa 18. Maalämpöjärjestelmän nettonykyarvoon on huomioitu vuosittainen 500 € huolto- ja korjauskustannus sekä kymmenen vuoden välein 5000 € kompressorien vaihtokustannus. Kaukolämmölle ei ole 30 vuoden tarkastelujaksolle varattu erityisiä korjauskustannuksia, koska nykyiset huoltoyhtiöt pystyvät huoltamaan lähes kaiken. Näin taloyhtiöiden ei tarvitse erikseen tilata kaukolämpöjärjestelmään huoltoa.

Taulukko 18. Järjestelmien kustannuksien nettonykyarvot 10, 20 ja 30 vuoden jälkeen.

Kustannuksien NPV			
	10 vuotta	20 vuotta	30 vuotta
Maalämpöjärjestelmä (€)	600 441	997 479	1 326 602
Kaukolämpöjärjestelmä ilman kaukokylmää(€)	622 980	1 073 521	1 429 502
Kaukolämpöjärjestelmä sis. kaukokylmän(€)	656 886	1 112 126	1 471 640

Jos kaukokylmä kuitenkin asennetaan uudisasuinkerrostaloon, nousee kaukolämpöjärjestelmän kustannuksien nettonykyarvo ennestään. Tällöin maalämpöjärjestelmän tuoma säästö on jo kymmenenvuoden aikana yli 55 000 €. Kolmenkymmenen vuoden tarkastelujaksolla säästö nousee lähes 150 000 €. Maalämpöjärjestelmän investointikustannuksiin on sisällytetty vapaajäähdytyksen osuus. Maalämpöjärjestelmän tapauksessa jäähdytys on jopa suositeltavaa asentaa maalämpöjärjestelmään järjestelmän paremman toimimisen kannalta. Tällöin maalämpöjärjestelmään liitetty vapaajäähdytys tulee niin sanottuna sivutuotteena kohtuullisen pienin investointikustannuksin. Kaukokylmän investointikustannus on taas huomattavasti suurempi kuin vapaakylmän maalämpöjärjestelmässä. Lisäksi kaukokylmä muutenkin tuo huomattavan paljon enemmän lisäasennuksia vapaajäähdytykseen verrattuna. Kokonaisuudessaan kustannuksien nettonykyarvot ovat kohtuullisen suuria, koska kustannuksiin on sisällytetty käyttäjän valaistuksen ja laitesähkön energiaosuudet.

9 Yhteenveto

Rakennusten energiamääräyksien kiristymisestä johtuen rakennuksien lämmitysjärjestelmiin joudutaan panostamaan yhä enemmän. Tämän vuoksi tutkimuskohteeseen suunnitellaan energiatehokas maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmä, joka tässä tutkimuksessa oli tavoitteena optimoida. Optimoinnin lisäksi maalämpö- ja jäähdytysjärjestelmän elinkaarikustannuksia verrattiin kaukolämmön vastaaviin kustannuksiin 30 vuoden tarkastelujaksolla.

Maalämmön- ja jäähdytyksen toimimisen kannalta lämpövirroilla energiakaivossa ja sen ympäristössä on suuri vaikutus. Energiakaivon energiataseista ja lämpövastuksista tehtiin tutkimuksessa selvitys, joka antaa energiakaivon lämpövirroista ja vastuksista hyvät perusteet. Energiakaivon vastukset pystytään määrittämään esimerkiksi kolmella eri menetelmällä, jotka ovat kokeellinen, analyyttinen tai numeerinen sekä lämpöpiiri. Esimerkki kokeellisiin menetelmiin perustuvasta menetelmästä on maaperään ennen maalämpö- ja jäähdytysjärjestelmän asennusta tehtävä TRT-mittaus.

Päätutkimusongelmana tutkimuksessa oli koko maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmän optimointi kolmeen asuinkerrostaloon, jotka rakennetaan Espoon Leppävaaraan. Optimointi laadittiin dynaamisen simulointiohjelman IDA-ICE:n ja MOBO-optimointiohjelman yhteistoiminnalla. Elinkaarikustannuksiltaan optimaaliseksi maalämpöjärjestelmäksi tutkimuksessa saatiin 100 kW lämpöpumppu, jonka lämmönkeruupiiri koostuu yhdestätoista 99,1 metrin energiakaivosta. Näissä energiakaivoissa lämmönsiirtonesteen yhteismassavirta on 3,65 kg/s, joka jakautuu tasaisesti kaikkien energiakaivojen kesken. Jäähdytys tehdään vapaajäähdytyksenä, vaikka simuloinnissa oletettiin jäähdytys saatavan aikaan lämpöpumpulla. Tällä asennuksella saadaan jäähdytyksen vaikutus simuloitua rakennuksen olosuhteisiin ja rakenteisiin, sillä simulointiohjelmassa ei ollut vapaajäähdytykselle vaihtoehtoa.

Ensimmäiseen tutkimusongelmaan liittyen oli tutkimuksessa tavoitteena myös verrata maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmän elinkaarikustannuksia kaukolämmön elinkaarikustannuksiin. Vertailussa optimaalisen maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmän elinkaarikustannuksien nettonykyarvo 30 vuoden tarkastelujakson aikana on yli 100 000 € edullisempi kuin kaukolämpöjärjestelmän, johon ei ole liitetty kaukokylmää. Jos kaukolämmön lisäksi rakennukseen asennetaan kaukokylmä, on kaukolämpö- ja -

kylmäjärjestelmien elinkaarikustannusten nettonykyarvo noin 145 000 € kalliimpi kuin maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmän. Jo kymmenen vuoden tarkasteluaajalla maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmän elinkaarikustannuksien nettonykyarvo on yli 20 000 € edullisempi kuin kaukolämmön vastaava arvo ilman kaukokylmän kustannuksia. Jos kaukokylmä otetaan huomioon, on kustannusten nettonykyarvojen ero jo kymmenen vuoden aikana yli 55 000 €.

Toinen tärkeä elinkaarikustannuksia vertaileva menetelmä eli takaisinmaksumenetelmä antoi myös maalämpöä ja -jäähdytystä suosivan lopputuloksen. Maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmän takaisinmaksuaika verrattuna kaukolämpöön ilman kaukokylmää on 5,74 vuotta ja kaukokylmän kanssa 3,43 vuotta. Näin ollen maalämpö- ja jäähdytysjärjestelmän asentaminen asuinkerrostaloihin on erittäin suositeltavaa. Lisäksi kohtuullisen helposti asennettava vapaajäähdytys lisää merkittävästi asukastyytyväisyyttä lämpöoloihin. Toki todellisuudessa maaperän hiljattainen lämpötilan lasku pidentää takaisinmaksuaikaa, mutta ei muuten vaikuta tutkimuksen lopputulokseen niin paljon etteikö maalämpö- ja jäähdytysjärjestelmä olisi kannattavampi asentaa kuin kaukolämpö.

Toinen tutkimusongelma oli lämpimän käyttöveden lämmittäminen maalämpöpumpulla kesäaikaan, jolloin lämpöpumppuun ei kohdistu muuta lämmityskuormaa. Tällöin ei kannata käynnistää lämpöpumpun kompressoreja liian usein ja lyhyiksi ajoiksi, jotta kompressorit kestäisivät pidempään. Mahdollisia ratkaisuja ovat kompressorien pehmokäynnistimet, osatehomitoitus, aurinkoenergian hyödyntäminen sekä energiavaraajan tarkemmat lämpötilasäädöt. Parannuskeinoista yleisesti käytössä ovat jo pehmokäynnistimet, osatehomitoitus sekä energiavaraajan tarkemmat lämpötilasäädöt. Aurinkoenergiakin hyödynnetään jo jonkin verran mutta aurinkoenergia on tulevaisuudessa suurimpia mahdollisuuksia käyttöveden lämmittämiseen kesäaikaan. Kun aurinkoenergian hyödyntämiseen käytettävien menetelmien investointikustannukset laskevat riittävästi ja järjestelmien tehokkuus paranee, tulevat aurinkoenergiajärjestelmät yleistymään merkittävästi. Nyt jo on hyvin perusteltua tutkia tarkemmin esimerkiksi aurinkosähkön hyödyntäminen asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmän yhteydessä. Aurinkosähkön avulla voitaisiin tuottaa lämmintä käyttövettä energiavaraajassa vastusten avulla. Tällä hetkellä vastukset on liitetty sähköverkkoon, jolloin kulutetaan ostoenergiaa.

Tutkimuksen lopulliseksi tulokseksi saatiin, että maalämpö- ja jäähdytysjärjestelmä on energiatehokas ja investointikustannuksiltaan edullisempi järjestelmä kuin kaukolämpö. Tutkimuksessa löydettiin myös elinkaarikustannuksiltaan optimaalinen maalämpö- ja -jäähdytysjärjestelmä asuinkerrostaloihin, vaikka pienen virheen tulokseen saattaa antaa energiakaivojen lukumäärän manuaalinen optimointi. Parempaan tulokseen olisi päästy, jos myös energiakaivojen määrä olisi optimoitu sopivalla optimointiohjelmalla. Lisäksi tulevaisuuden kannalta johtopäätöksenä voidaan mainita, että aurinkosähkön hyödyntämismahdollisuus maalämmön tukena lämpimän käyttöveden lämmittämisessä kesäaikana tulee tutkia paremmin.

Lähteet

Aalto University. 2013. *IDA Early Stage Building Optimization (ESBO), Käyttöopas*. Aalto University. Espoo.

Aalto Yliopisto. 2013. *MOBO Beta 0.3a Manual Version 1.3 -ohjelmisto*. Aalto Yliopisto. Espoo.

Aalto Yliopisto. 2013. *User manual: MOBO Beta 0.3a Manual Version 1.3*. Aalto Yliopisto. Espoo.

ABB Oy. 2011. *Pehmökäynnistinopas*. ABB Oy, Kotimaan myynti. Helsinki.
Acuña, J.. 2010. *Improvements of U-pipe Borehole Heat Exchangers*. KTH School of Industrial Engineering and Management. Division of Applied Thermodynamic and Refrigeration. Stockholm. ISBN 978-91-7415-660-7.

Acuña, J.. 2013. *Distributed thermal response tests – New insights on U-pipe and Coaxial heat exchangers in groundwater-filled boreholes*. Division of Applied Thermodynamics and Refrigeration. Stockholm. ISBN 978-91-7501-626-9.

Aittomäki, A. ym.. 2012. *Kylmäteknikka*. Painos 4. Suomen kylmäyhdistys ry. Helsinki. ISBN 978-95-1964-497-4.

Al-Khoury, R.. 2012. *Computational Modeling of Shallow Geothermal Systems*. Taylor & Francis Group. Lontoo. ISBN 978-0-203-13809-0.

Antics, M. & Sanner, B.. 2007. *Status of Geothermal Energy Use and Resources in Europe*. Proceedings European Geothermal Congress 2007. Brussel.

Anzellini, S. ym.. 2013. *Melting of Iron at Earth's Inner Core Boundary Based on Fast X-ray Diffraction*. Science. Washington.

Bandyopadhyay, G., Gosnold, W. & Mann, M.. 2008. *Analytical and semi-analytical solutions for short-time transient response of ground heat exchangers*. Energy and Buildings, Vol 40. Grand Forks.

Bayer, P. ym.. 2012. *Greenhouse gas emission savings of ground source heat pump systems in Europe: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Zurich, Germany.

Bennet, J. C. J. H. G.. 1987. *Multipole Method to Compute the Conductive* 1987. *Multipole Method to Compute the Conductive Heat Transfer to and between Pipes in a Composite Cylinder. Notes on Heat Transfer 3-1987*. Department of Building Physics, Lund Institute of Technology. Lund.

Bertani, R.. 2010. *Geothermal Power Generation in the World 2005-2010 Update Report*. Proceedings World Geothermal Congress 2010. Bali.

Cabeza, L. F.. 2012. *Thermal Energy Storage. Vol 3*. Comprehensive Renewable Energy.

Caruna Espoo Oy. 2014. *Sähkön siirron hinnasto*. Saatavissa: https://www.fortum.fi/countries/fi/SiteCollectionDocuments/Sahkon-siirto-ja-liittymat/Carunan%20hinnastot/WEB_Caruna_FED_Verkkopalveluhinnasto_2014_FI.pdf

Cengel, Y. A. & Ghajar, A. J.. 2006. *Heat and Mass Transfer, A Practical Approach*, 3rd Edition. s.473-475. McGraw-Hill. New York.

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. & Meyarivan, T.. 2002. *A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II*. IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, VOL. 6, NO. 2. Kanpur.

Desideri, U., Sorbi, N., Arcioni, L. & Leonardi, D.. 2011. *Feasibility study and numerical simulation of a ground source heat pump plant applied to a residential building*. Applied Thermal Engineering. Perugia.

EED 3.0, 2008. *Eart Energy Designer Manual*. Saatavissa: <http://www.buildingphysics.com/manuals/EED3.pdf>.

Energiatoteellisuus, 2014. *Kaukolämmön hinnasto*. Saatavissa: http://energia.fi/sites/default/files/hinta_010714.xls

Environment European Agency. 2012. *Energy efficiency and energy consumption in the household sector (ENER 022)*.

EQUA Simulation AB, Erkki Karjalainen. 2014. *IDAGuide for using MOBO with IDA-ICE*. EQUA Simulation AB. Finland.

EQUA Simulation AB. 2012. *Description of the IDA ICE borehole model*. EQUA Simulation AB. Stockholm.

EQUA Simulation AB. 2013. *User Manual IDA Indoor Climate and Energy 4.5*. EQUA Simulation AB. Stockholm. Saatavilla: <http://www.equa.se/deliv/ICE45eng.pdf?lic=ICE40:4812%20>.

Eskilson, P.. 1987. *Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes*. University of Lund, Sweden.

Eskola, L., Jokisalo, J. & Siren, K.. 2012. *Lämpöpumppujen energialaskentaopas*. Aalto Yliopisto. Espoo.

Eugster, W. J. & Burkhard, S.. 2007. *Technological Status of Shallow Geothermal Energy in Europe*. Proceedings European Geothermal Congress.

Euroopan parlamentti & Euroopan unionin neuvosto, 2010. *Direktiivi 2010/31/EU. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 19. päivänä toukokuuta 2010 rakennusten energiatehokkuudesta*.

Florides, G. & Kalogirou, S., 2006. *Ground heat exchangers—A review of systems, models and applications*. Renewable Energy. Nicosia.

Fortum Oy, 2014. *Sähköenergiakustannukset. Saatavissa:*
<http://www.fortum.com/countries/fi/yksityisasiakkaat/hinnastot/sahkosopimuksen-hinta-kesto/pages/default.aspx>

Gehlin, S.. 2002. *Thermal Response Test: Method Development and Evaluation. Doctoral thesis.* Luleå University of Technology. Division of Water Resources Engineering. Department of Environmental Engineering. Luleå. ISSN: 1402 - 1544.

Gehlin, S. E. A. & Hellström, G.. 2003. *Influence on thermal response test by groundwater flow in vertical fractures in hard rock.* Renewable Energy. Stockholm & Lund.

Glassley, W. E.. 2010. *Geothermal Energy: Renewable Energy and the Environment.* CRC Press. Boca Raton.

GTK. 2011. *Geologiasta kestävä kasvua ja hyvinvointia.* GTK.

GTK. 2011. *Terminen vastetestti eli TRT.* Saatavilla:
<http://www.gtk.fi/tutkimus/tutkimusohjelmat/energia/trtmittaus.html>.

Gustafsson, A.-M.. 2010. *Thermal Response Tests: Influence of convective flow in groundwater filled borehole heat exchangers.* Luleå University of Technology. Luulaja.

Hellström, G.. 1998. *THERMAL PERFORMANCE OF BOREHOLE HEAT EXCHANGERS.* Lund Institute of Technology. Lund.

Helsingin energia. 2014. *Sähköposti: Kaukokylmän energian hinta.* Saatavissa: ISS Proko Oy. Helsinki.

He, M., Rees, S. & Shao, L.. 2009. *Simulation of a domestic ground source heat pump system using a transient numerical borehole heat exchanger model.* Eleventh International IBPSA Conference. Glasgow, Scotland.

Holopainen, R., Vares, S., Ritola, J. & Pulakka, S.. 2010. *Maalämmön ja -viilennyksen hyödyntäminen asuinkerrostalon lämmityksessä ja jäähdytyksessä.* VTT. Espoo.

IDA Indoor Climate and Energy, 2012. *Simulointiohjelmisto.* EQUA Simulation AB. Stockholm.

Juvonen, J.. 2009. *Lämpökaivo - Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa.* Finnish Environment Institute (SYKE). Helsinki. ISBN: 978-952-11-3531-6.

Juvonen, J. & Lapinlampi, T.. 2013. *Ympäristöopas 2013. Energiakaivo - Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa.* Ympäristöministeriö. Helsinki.

Lahti, T., 2013. *Lämpökaivokenttä lämmönlähteenä. Diplomityö.* Tampereen Teknillinen Yliopisto. Tampere.

Laitinen, A. ym.. 2014. *Renewable energy production of Finnish heat pumps. Final report of the SPF-project.* VTT Technical Research Centre of Finland. Espoo.

- Lamarche, L., Kaji, S. & Beauchamp, B.. 2010. *A review of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heat-pump systems*. Geothermics. Montreal.
- Lee, C. & Lam, H.. 2008. *Computer simulation of borehole ground heat exchangers for geothermal heat pump systems*. Renewable Energy, Vol 33. Hong Kong.
- Leppäharju, N., 2008. *Kalliolämmön hyödyntämiseen vaikuttavat geofysikaaliset ja geologiset tekijät. Pro Gradu -tutkielma*. Oulun yliopisto, Fysikaalisten tieteiden laitos. Oulu.
- Leppäharju, N., Turunen, T. & Kallio, J., 2010. *Bergansin geoenergiatutkimukset ja energiakaivokentän mallinnus*. Geologian tutkimuskeskus (GTK). Kokkola.
- LVI-Suunnittelu Amplan Oy, Ari Virnes, 2013. *Energiaselvitys, As Oy Espoon Mestarinkatu 12*. Saatavilla: ISS Proko Oy. Vantaa.
- Lämpöyökkönen. 2014. *Sähköposti. Määlämpöjärjestelmien hinnasto*. Helsinki.
- Lämpöässä. 2014. *Maaenergia esite*. Saatavissa: <http://www.lampoassa.fi/fi/maaenergiaan-liittyvaa-sanastoa>.
- Nabi, M. & Al-Khoury, R.. 2012. *An efficient finite volume model for shallow geothermal systems — Part II: Verification, validation and grid convergence*. Computers & Geosciences. Delft.
- Nabi, M. & Al-Khoury, R.. 2012. *An efficient finite volume model for shallow geothermal systems. Part I: Model formulation*. Computers & Geosciences. Delft.
- Nylund, J., 2010. *Kalliolämpö osana uusiutuviin energioihin perustuvaa arktista lämmitysjärjestelmää. Diplomityö*. Aalto yliopiston teknillinen korkeakoulu. Espoo.
- Oilon. 2014. *Käyttöohje MH 5 - MH 11*. Saatavilla: www.oilon.com.
- Omer, A. M.. 2006. *Ground-source heat pumps systems and applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Nottingham.
- Paul, N. D.. 1996. *The Effect of Grout Thermal Conductivity on Vertical Geothermal Heat Exchanger Design and Performance. M.Sc. Thesis*. South Dakota University. Vermillion, SD.
- Perkola, T., 2014. *Ohjelmistoarkkitehtuurin monitavoiteoptimointi, Pro gradu -tutkielma*. Tampereen yliopisto, Informaatiotieteiden yksikkö. Tampere.
- Rantanen, K., 2008. *Geolämpö ei lopu*. Tiedelehti. Saatavilla: http://www.tiede.fi/artikkeli/937/geolampo_ei_lopu.
- Rototec Consulting Ab, Björn Thelin. 2013. *EED-simulointi, Mestarinkatu 12*. Saatavilla: ISS Proko Oy. Espoo, Stockholm.
- Rybach, L.. 2012. *Shallow Systems: Geothermal Heat Pumps*. Comprehensive Renewable Energy. Volume 7. Zurich.

- Saari, A., 2009. *Maalämpö tulee vauhdilla myös suuriin rakennuksiin*. Yle.
- Sanner, B., Karytsas, C., Mendrinos, D. & Rybach, L.. 2003. *Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage and underground thermal energy storage in Europe*. Geothermics. Giessen.
- Self, S. J., Reddy, B. V. & Rosen, M. A.. 2012. *Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating systems*. Applied Energy. Oshawa.
- Shargawy, M. H., Mokheimer, E. M. & Badr, H. M.. 2009. *Effective pipe-to-borehole thermal resistance for vertical ground heat exchangers*. Geothermics. Cambridge & Dhahran.
- Signorelli, S., Bassetti, S., Pahud, D. & Kohl, T.. 2006. *Numerical evaluation of thermal response tests*. Elsevier Ltd. Zürich. doi:10.1016/j.geothermics.2006.10.006Z.
- Siren, K.. 2012. *Lyhyt johdatus rakennusten energioptimointiin*. Aalto yliopisto. Espoo.
- Siren, K.. 2010. *Rakennusten energiainvestointien kannattavuuden laskenta*. Aalto yliopisto. Espoo.
- Suomen Lämpöpumpputekniikka Oy. 2012. *Käyttöohje, Lämpöässä Vs 6.0 - 12.0*. Suomen Lämpöpumpputekniikka Oy. Lapua. Saatavissa: http://www.lampoassa.fi/sites/lampoassa.fi/files/kayttoohje_vs.pdf.
- Vatajankosken Sähkö Oy. *Tietoa maalämmöstä*. Vatajankosken Sähkö Oy. Kankaanpää. Saatavilla: http://www.vatajankoski.fi/upload/tekstitiedostot/useinkysytyt/maalampo-opas_vatajankoskensahko.pdf.
- Vihola, J. & Heljo, J.. 2012. *Lämmitystapojen kehitys 2000-2012 -aineistoselvitys*. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Tampere.
- Wood, C. J., Liu, H. & Riffat, S.. 2010. *Comparison of a modelled and field tested piled ground heat exchanger system for a residential building and the simulated effect of assisted ground heat recharge*. International Journal of Low-Carbon Technologies Advance Access. Nottingham.
- Wood, C. J., Liu, H. & Riffat, S. B.. 2011. *Comparative performance of 'U-tube' and 'coaxial' loop designs for use with a ground source heat pump*. Applied Thermal Engineering. Nottingham.
- World Energy Resources. 2013. *Geothermal*. World Energy Council 2013.
- Yang, H., Cui, P. & Fang, Z.. 2009. *Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: A review of models and systems*. Applied Energy. Hong Kong.
- Ympäristöministeriö. 2002. *C4 Suomen rakennusmääräyskokoelma*. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. Helsinki.
- Ympäristöministeriö. 2002. *D2 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto*. Ympäristöministeriö. Helsinki.

Ympäristöministeriö. 2011. *Tasauslaskentaopas 2012. Rakennuksen lämpöhäviön määräystenmukaisuuden osoittaminen*. Ympäristöministeriö. Helsinki.









Ympäristöministeriö. 2012. *D3 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakennusten energiatehokkuus*. Ympäristöministeriö. Helsinki.

Zeng, H., Diao, N. & Fang, Z., 2003. *Heat transfer analysis of boreholes in vertical ground heat exchangers*. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol 46. Jinan.

Liitteet






Liite 1. Optimoidun järjestelmän energiasimuloinnin tulokset.

Ostoenergiankulutusraportti

		Ostoenergiankulutus		Tarve	Kokonaisenergia	
		kWh	kWh/m ²	kW	kWh	kWh/m ²
	Valaistus, kiinteistö	15635	2.4	1.79	26579	4.1
	Laitteet, kiinteistö	34107	5.2	3.89	57982	8.9
	Jäähdytys	4532	0.7	43.81	7704	1.2
	LVI sähkö	74337	11.4	8.82	126373	19.3
	Sähkölämmitys, kiinteistö	209093	31.9	138.6	355458	54.3
	Yhteensä, Kiinteistösähkö	337704	51.6		574096	87.7
	Yhteensä	337704	51.6		574096	87.7
	Valaistus, asukas	43129	6.6	4.92	73319	11.2
	Laitteet, asukas	94099	14.4	10.74	159968	24.4
	Yhteensä, Asukkaan sähkö	137228	20.9		233287	35.6
	CHP tuotto	0	0.0	0.0	0	0.0
	Yhteensä, Tuotettu sähkö	0	0.0		0	0.0
	Yhteensä	474932	72.5		807383	123.3

Kuva 24. Optimoidun maalämpö- ja jäähdytysjärjestelmän ostoenergiankulutus.








kWh (tuntuva ja sidottu)

Kuukausi	Tilalämmitys	Tilajäähdytys	Lämmitys IV-koneella	Jäähdytys IV-koneella	Lämmin käyttövesi
					
1	29438.0	0.0	12916.0	0.0	19717.0
2	24738.0	0.0	13104.0	0.0	17753.0
3	20406.0	0.0	10520.0	0.0	19660.0
4	7683.0	0.0	3399.0	136.6	19071.0
5	492.0	0.0	123.4	1120.0	19745.0
6	264.1	0.0	9.8	3136.0	19113.0
7	144.0	0.0	0.0	8672.0	19754.0
8	142.6	0.0	0.0	8073.0	19774.0
9	1106.0	0.0	266.5	387.0	19104.0
10	10821.0	0.0	1916.0	0.0	19733.0
11	21147.0	0.0	7277.0	0.0	19059.0
12	26628.0	0.0	9998.0	0.0	19775.0
Yhteensä	143009.7	0.0	59529.7	21524.6	232258.0

Kuva 25. Optimoidun maalämpö- ja jäähdytysjärjestelmän järjestelmien energiat.

Talteenotettu ja omavaraisenergia

kWh (tuntuva ja sidottu)

Kuukausi	LTO	jäähdytyksen talteenotto	Lämmöntalteenotto, primäärijärjestelmä	jäähdytyksen talteenotto, primäärijärjestelmä	Aurinkolämpö	Maalämpö	Maajäähdytys	Ulkoilma lämpö	Ulkoilma jäähdytys
									
1	46581.0	0.0				22570.0	0.0		
2	42059.0	0.0				19122.0	0.0		
3	44835.0	0.0				19634.0	0.0		
4	29898.0	-0.0				13243.0	-1.6		
5	16614.0	-1.7				8534.0	-410.7		
6	7565.0	-0.0				6764.0	-1365.0		
7	2557.0	-27.2				4322.0	-4950.0		
8	5048.0	-65.4				5479.0	-5885.0		
9	15849.0	-0.0				9113.0	-30.0		
10	27291.0	0.0				14571.0	0.0		
11	37421.0	0.0				18823.0	0.0		
12	44206.0	0.0				21826.0	0.0		
Yhteensä	319924.0	-94.3				164001.0	-12642.4		

Kuva 26. Optimoidun maalämpö- ja jäähdytysjärjestelmän omavaraisenergiat.